



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

ISAAC SILVA DOS SANTOS JÚNIOR



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE ECONÔMICA DE SUBSTITUIÇÃO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA POR  
UMA PLANTA EÓLICA**



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2018

ISAAC SILVA DOS SANTOS JÚNIOR

ANÁLISE ECONÔMICA DE SUBSTITUIÇÃO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA POR UMA PLANTA  
EÓLICA

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar De Oliveira, M. Sc.

Campina Grande  
2018

ISAAC SILVA DOS SANTOS JÚNIOR

ANÁLISE ECONÔMICA DE SUBSTITUIÇÃO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA POR UMA PLANTA  
EÓLICA

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em 03 / 08 /2018

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

Professor Leimar De Oliveira, M. Sc  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por seu amor incondicional e generoso, por abrir as portas, não me deixar sozinho e iluminar meu caminho. A Ti, Senhor, a quem sirvo, toda a honra: entrego tudo o que fui, o que sou e o que serei.

Aos meus pais, Isaac e Conceição, pelo exemplo de caráter, amabilidade, apoio e sabedoria. Por não duvidarem de mim até nos momentos que eu próprio o fiz. A vocês, meus pais amados, minha eterna gratidão.

Aos meus queridos irmãos, Isadora, Isabela e José Igor, dádiva divina, por ter me amado de uma forma tão pura. Por terem me mostrados, com pequenos atos, o significado de um amor puro.

A minha namora, Rafaela Braz, por me mostrar na prática o significado do companheirismo. Por estar comigo não somente nos momentos felizes e por cultivar em mim um sentimento tão genuíno que é o amor.

Aos colegas que Elétrica me proporcionou conhecer: Thiago, Klynger, Gabriel, Marcus, Yuri, Arthur, Rafael, Igor, Vinícius, Marcus e tantos outros. A caminhada foi melhor ao lado de vocês.

Ao meu professor orientador, Leimar de Oliveira, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, pelos vários ensinamentos adquiridos, pelo apoio e por me guiar ao longo dessa jornada.

Aos professores de Elétrica pelos conhecimentos e exemplos adquiridos ao longo dessa graduação.

Aos funcionários do DEE, em especial Adail e Tchai, que sempre estiveram acessíveis, disponíveis e com uma imensa vontade em ajudar, por menor que tenha sido o problema.

Por fim a toda UFCG, pelo suporte dado ao longo da graduação.

## RESUMO

Devido a fatores climáticos como as crises hídricas e emissão de poluentes pelas termelétricas, as fontes renováveis apresentam uma crescente participação na composição da matriz energética brasileira. A principal fonte primária é a energia eólica. Com tudo, a geração eólica apresenta limitações em relações aos vetores mais tradicionais como as termelétricas, como por exemplo capacidade de resposta na geração face uma mudança instantânea na carga e custos para a implementação. Devido a essas desvantagens, o presente trabalho modela duas centrais geradoras de energia, uma eólica e uma termelétrica e as comparam, detectando em que ponto o investimento de uma fazenda eólica se torna economicamente viável em relação a uma termelétrica pelo viés dos custos. Para tanto, a modelagem é feita a partir de dados de velocidade do vento medidos *in loco* e ferramentas computacionais como o software WindPRO.

**Palavras-chave:** Modelagem; Usina termelétrica; Parque Eólico; WindPRO; Análises comparativas e Custos.

## ABSTRACT

Due to climatic factors such as water crises and emission of pollutants by thermoelectric plants, renewable sources have a growing participation in the composition of the Brazilian energy matrix. The main exponent of these sources is wind power. However, wind generation presents limitations in relation to the more traditional vectors such as thermoelectric generators, such as response capacity in generation, due to an instantaneous change in load and costs for implementation. Due to these disadvantages, the present work models two power plants, a wind power plant and a thermoelectric plant, comparing them, detecting at what point the investment of a wind farm becomes economically viable in relation to a thermoelectric plant due to cost bias. To do so, the modeling is done from measured wind speed data in loco and computational tools such as the WindPRO software.

**Palavras-chave:** Modeling; Thermal Power Plant; Wind farm; WindPRO; Comparative Analyses e Costs.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz de Energia Elétrica Brasileira (GWh) em 2017 .....	14
Figura 2 - Potência por Fonte de Energia (Leilão 2017).....	15
Figura 3 - Disposição dos Equipamentos de uma Termelétrica .....	17
Figura 4 - Motor a Combustão Interna .....	17
Figura 5 - Circulação geral do ar no atlântico sul .....	20
Figura 6 - Comportamento Variável da Velocidade do Vento .....	20
Figura 7 - Densidade de Probabilidade do Vento.....	22
Figura 8 - Turbina Eólica .....	23
Figura 9 - Complementariedade da Geração Térmica frente à Eólica .....	24
Figura 10 - Mapa Eólico da Paraíba (120 m).....	29
Figura 11 - Densidade do Ar na Paraíba.....	30
Figura 12 - Curva de Potência Aerogerador Escolhido .....	31
Figura 13 –Windvane e Anemômetro de copo .....	35
Figura 14 - Vista do local para implementação do parque eólico .....	36
Figura 15 - Velocidade Média Horária do Vento.....	45
Figura 16 - Velocidade/Direção do vento .....	45
Figura 17 - Distribuição de Weibull.....	46
Figura 18 - Energia x Velocidade do vento (para uma turbina) .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado de Projetos Vencedores Leilão de Energia .....	14
Tabela 2 - Parâmetros do Motor WÄRTSILÄ 18V32 .....	27
Tabela 3 – Parâmetros do OCB1 .....	28
Tabela 4 - Parâmetros do aerogerador Siemens SWT 2.3-113 .....	31
Tabela 5 – Custo Associados à construção de Linha de Transmissão .....	32
Tabela 6 – Faixa de Rugosidade para Cobertura do Solo .....	36
Tabela 7 - Energia Gerada por Aerogerador .....	47



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAGET – Associação Brasileira de Geradores Termelétricas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

EAG – Energia Anual Gerada

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

HFO – Óleo Combustível Pesado

MME – Ministério de Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PCI – Poder Calorífico Inferior

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIN – Sistema Interligado Nacional

c = fator de escala

k = fator de forma

$C_{LT}$  = custo da linha de transmissão

$custos_{eólica}$  = custos da geração eólica modelada

n = número de aerogeradores do projeto

$V_{aero}$  = valor unitário do aerogerador

$custos_{termo}$  = custos da geração termelétrica

q = quantidade de anos de operação da termoelétrica.

P = potência disponível [kW].

m = massa do fluido que sofre a transformação térmica [kg/s].

$h_1$  = entalpia específica do fluido na entrada da máquina térmica [kJ/s].

$h_2$  = entalpia específica do fluido na saída da máquina térmica [kJ/s].

$\rho$  = massa específica do vento [kg/m<sup>3</sup>].

$A$  = área da seção transversal [m<sup>2</sup>].

$\eta$  = rendimento.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>1.1. Motivação</b> .....	11
<b>1.2. Objetivos do Trabalho</b> .....	11
<b>1.3. Estrutura do Trabalho</b> .....	11
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	13
<b>2.1. Geração Elétrica no Brasil</b> .....	13
<b>2.2. Centrais Termelétricas</b> .....	15
<b>2.2.1. Funcionamento de uma Central Termelétrica</b> .....	16
<b>2.2.2. Despacho Energético</b> .....	18
<b>2.3. Energia Eólica</b> .....	19
<b>2.3.1. O Vento</b> .....	19
<b>2.3.2. Potencial Eólico</b> .....	22
<b>2.3.3. Despacho Energético</b> .....	24
<b>2.4. WindPro</b> .....	25
<b>3. MODELAGEM</b> .....	27
<b>3.1. Termelétrica</b> .....	27
<b>3.2. Parque Eólico</b> .....	29
<b>4. ANÁLISES DOS DADOS DO WINPRO</b> .....	34
<b>4.1. Medições do Vento</b> .....	34
<b>4.2. Simulações WindPro</b> .....	35
<b>4.3. Comparação Termelétrica</b> .....	37
<b>4.4. Análises de Custos</b> .....	39
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42
<b>APÊNDICE A</b> .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de diversificação e flexibilização da matriz energética brasileira, impulsionada principalmente pelas fontes renováveis nos últimos anos, fornece ao país uma maior garantia na oferta de energia e conseqüentemente o aumento da confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Entretanto, o aproveitamento de tais recursos esbarra em três aspectos: ambientais, energéticos e econômicos; conforme afirma (VICHI; MANSOR, 2009).

Dentre os diversos vetores que compõe a matriz de energia elétrica brasileira, as hidrelétricas, termelétricas e eólica merecem um destaque.

As hidrelétricas correspondem a principal fonte de geração de energia elétrica, totalizando cerca de 70% da geração do país.

A geração termelétrica exerce papel importante, pois possui alta flexibilidade operativa, não é sujeita a imprevisibilidade de existência de recursos naturais (sol, vento e chuva). Além disso, esse tipo de geração possui a capacidade de armazenamento (exceto de combustíveis a gás natural) e pode ser implantada em pontos com facilidade de recursos de conexão à rede, o que reduz os investimentos na rede de transmissão (ABRAGET, 2011).

Associado aos benefícios, as centrais termelétricas apresentam desvantagens face aos outros vetores. Apresenta um maior gasto à geração de energia devido ao fato do aumento constante no preço dos combustíveis utilizados. Além do mais há os danos causados ao meio ambiente, tanto na extração da matéria-prima como na geração de energia com a liberação de gases amplificadores do efeito estufa (COELHO, 2015).

A energia eólica pode ser uma alternativa frente as desvantagens das centrais térmicas, uma vez que no seu processo de geração não há a emissão de gases poluentes. Em contrapartida, o seu uso é limitado uma vez que apresenta uma forte dependência das condições climáticas, principalmente a velocidade do vento, o que interfere, de forma direta, na energia gerada.

Diante do exposto, o estudo das relações energéticas e econômicas que envolvem a seleção de um projeto para geração de energia elétrica se mostra relevante em busca de um empreendimento que maximize a produção ao passo que minimize os custos para implementação e manutenção do mesmo.

### 1.1. Motivação

A construção do trabalho surgiu a partir da detecção do crescente número de projetos eólicos que o Brasil apresentou nas últimas décadas, tornando-o uma realidade na matriz energética nacional.

É observado que as características da geração eólica são antagônicas em relação às termelétricas, outro importante vetor que desempenha papel importante na confiabilidade do SEP.

Dessa forma, na seleção de projetos, o aspecto econômico se torna a principal ferramenta na escolha de qual empreendimento construir.

### 1.2. Objetivos do Trabalho

Os objetivos do presente trabalho, face as problemáticas evidenciadas, são listados a seguir:

- Modelar uma central termelétrica;
- Modelar um parque eólico com o auxílio do *software* WindPRO;
- Determinar quais as condições econômicas que se torna viável a implementação de um parque eólico em detrimento a uma central termelétrica convencional.

### 1.3. Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido nos seguintes capítulos.

No Capítulo 1, como visto anteriormente, é apresentado a problemática, a motivação que levou ao desenvolvimento do trabalho, os objetivos que se espera atingir e a organização de todo o documento;

No segundo Capítulo é realizado a fundamentação teórica, em que é apresentado a atual conjuntura da matriz energética brasileira, bem como os principais aspectos na geração de energia elétrica através de centrais termelétricas e eólicas, além de apresentar o *software* WindPRO, utilizado ao longo do trabalho.

No Capítulo 3 modela-se uma central termelétrica com ênfase para seus aspectos energéticos e econômicos. É também modelado um parque eólico com auxílio do WindPRO e uma série de dados temporais sobre velocidade do vento.

O quarto Capítulo fornece os resultados obtidos bem como a discussão desses dados;

O Capítulo 5 é conclusivo e apresenta as principais conclusões obtidas ao fim do trabalho.

No Capítulo 6 é apresentado as referências bibliográficas utilizadas para a realização do projeto de conclusão de curso.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta um apêndice com imagens ilustrativas sobre as simulações realizadas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo é abordado a atual matriz de energia elétrica do Brasil. Em seguida é analisado as principais características da geração das centrais termelétricas e eólicas.

### 2.1. Geração Elétrica no Brasil

A fim de entender a importância das centrais termelétricas e dos parques eólicos, um estudo prévio sobre a composição da matriz energética brasileira torna-se importante, partindo do princípio que sua principal característica é a de ser majoritariamente hidráulica.

Conforme apresentado na Figura 1, observa-se que a energia elétrica brasileira provém, majoritariamente, de centrais hidrelétricas totalizando cerca de 70% da energia gerada no país. Em segundo lugar, desempenhando um papel de tamanha importância, encontra-se as unidades térmicas com aproximadamente 20% da geração anual do país. A energia eólica apresentou um crescimento ao longo dos últimos anos e hoje corresponde a 7,4% do montante anual gerado.

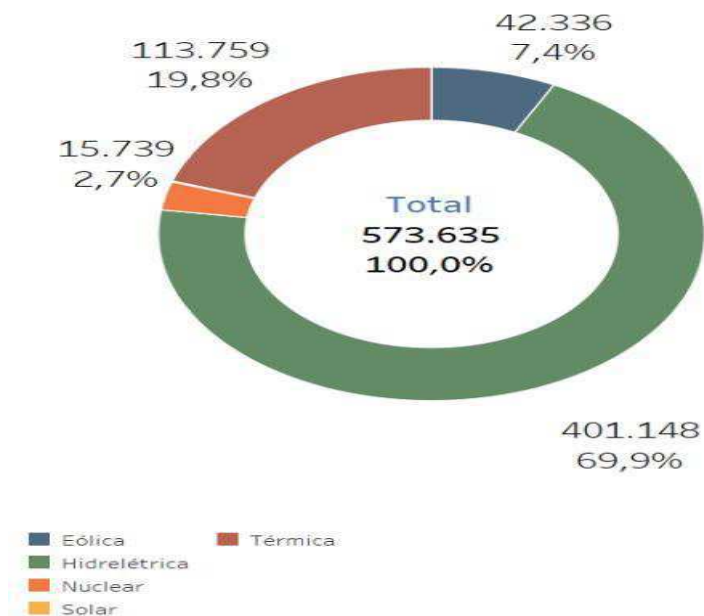
Ao longo dos anos de 2016 e 2017, o Brasil enfrentou um período de estiagem hídrica o que proporcionou uma redução do nível dos reservatórios de água. Com isso, o sistema foi suprido principalmente por térmicas e eólicas.

Uma importante ação que torna o sistema mais confiável em relação a fenômenos semelhantes ao ocorrido em 2016 e 2017 é a realização de leilões para geração de energia. Nestes leilões novos projetos são submetidos para integrarem o Sistema Interligado Nacional (SIN), o que reflete o planejamento de expansão do setor elétrico.

Em dezembro de 2017 foi retomada a contratação de novos empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil por meio de leilões estabelecidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Estes leilões se destinam ao suprimento do mercado regulado, oferecem contratos de longo prazo aos geradores, compram

projetos de geração respaldados por energia firme e fazem parte do mecanismo para adequabilidade do suprimento do país. (EPE, 2017).

Figura 1 - Matriz de Energia Elétrica Brasileira (GWh) em 2017



Fonte: ONS (2018)

Conforme informe publicado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), responsável pela realização do último leilão de energia em dezembro de 2017, os projetos contratados superam 3,5 GW de potência instalada e apresentam data de início de operação para 2023. A Tabela 1 e a Figura 2 apresentam os dados principais desses projetos.

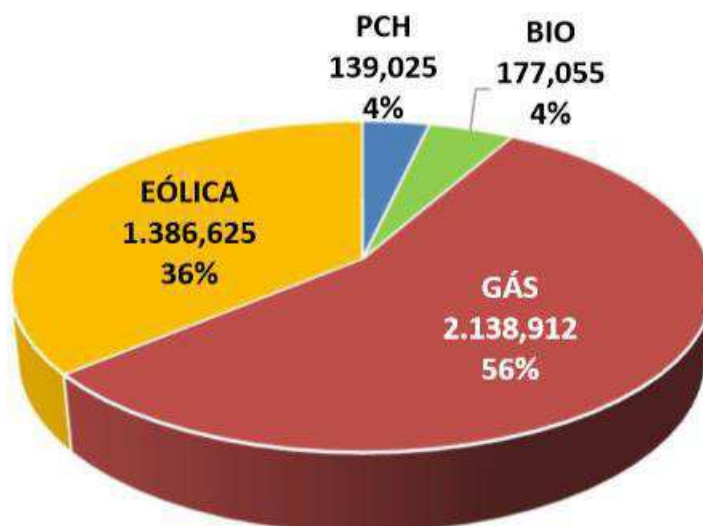
Tabela 1 - Resultado de Projetos Vencedores Leilão de Energia

Fonte	Projetos	Oferta (MW)	Garantia Física (Mwmed)
Eólica	49	1.386,63	773,600
Gás Natural	2	2.138,91	1.968,3
Biomassa	6	177,07	112,50
PCH	6	139,03	76,53
Total	63	3.842	-



Fonte: EPE, 2017

Figura 2 - Potência por Fonte de Energia (Leilão 2017)



Fonte: EPE, 2017

Fica comprovado, a partir da homologação do último leilão de energia da CCEE, o aumento da importância da fonte eólica para o projeto de expansão do sistema, uma vez que 78% dos projetos aprovados envolve a construção de parques eólicos.

A partir da análise energética do último leilão de energia homologado, pode-se verificar a importância do recurso eólico e térmico na composição futura da matriz energética brasileira, uma vez que a combinação dos dois vetores representa 92% da nova energia gerada prevista para 2023.

## 2.2. Centrais Termelétricas

Neste tópico é detalhado as principais características de funcionamento das termelétricas junto com o seu aproveitamento energético. Em seguida, realiza-se um breve estudo sobre as modalidades de despacho dessas centrais.

### 2.2.1. Funcionamento de uma Central Termelétrica

Usina termelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a produção de energia elétrica, através da queima de combustíveis (FURNAS, 2018). Tal sistema

O processo fundamental de conversão de funcionamento das centrais termelétricas baseia-se na conversão de energia térmica em energia mecânica e esta em energia elétrica (REIS, 2012).

Pode-se dividir o processo de geração de uma termelétrica convencional em três principais etapas.

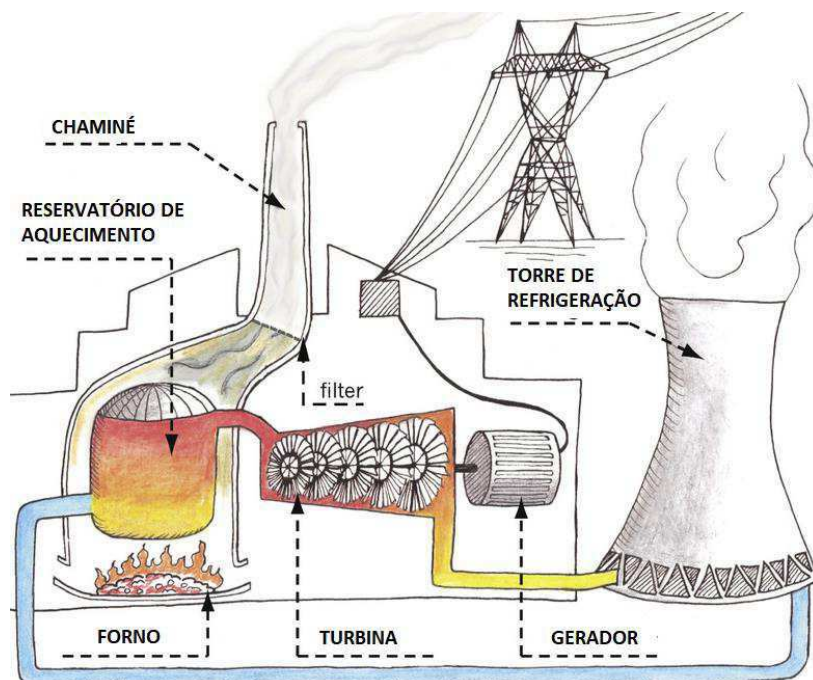
A primeira etapa consiste na queima de um combustível fóssil, como carvão, óleo diesel ou gás. O calor gerado na combustão aquece um reservatório transformando a água contida em seu interior em vapor.

Na segunda etapa, o processo de expansão do fluido produz trabalho em uma turbina. O acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina permite a conversão da energia mecânica em elétrica (REIS, 2012).

A terceira etapa é caracterizada pela condensação do vapor. O calor residual pode ser lançado diretamente no meio ambiente, é o chamado Ciclo Simples, ou ele pode ser utilizado para acionar uma segunda turbina, o que aumenta o rendimento da planta, é o chamado Ciclo Combinado.

A disposição física dos equipamentos de uma central termelétrica de Ciclo Simples é conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Disposição dos Equipamentos de uma Termelétrica

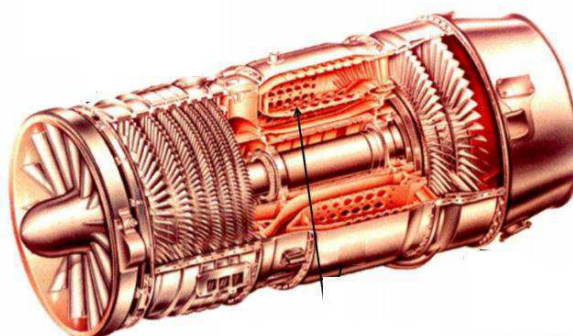


Fonte: .mstworkbooks, 2018

Outro método de classificação das termelétricas é quanto as características da combustão com relação ao processo de transferência de energia. Uma usina pode ser classificada como turbina de combustão externa ou interna, dependendo de onde a combustão ocorre. Caso ela ocorra fora do motor, é denominada de combustão externa, caso ela ocorra no interior do motor, é denominada de combustão interna.

O motor a combustão interna tem uso majoritário quando se utiliza óleo combustível ou diesel na operação. Ele é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Motor a Combustão Interna



Fonte: Fernando Porto, 2018

Nas termelétricas de combustão externa, o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho, diferente das usinas de combustão interna, onde a combustão é efetuada através de uma mistura de combustível e ar.

Independente da sua configuração, a central termelétrica tem o objetivo de gerar energia, contudo, a potência gerada e a energia produzida em uma central termelétrica dependem de vários fatores (REIS, 2012).

Em um sistema térmico ideal, a potência extraível é dada por:

$$P = m(h_1 - h_2)$$

Onde:

$P$  = potência disponível [kW];

$m$  = massa do fluido que sofre a transformação térmica [kg/s];

$h_1$  = entalpia específica do fluido na entrada da máquina térmica [kJ/s];

$h_2$  = entalpia específica do fluido na saída da máquina térmica [kJ/s].

Contudo, todo o processo é submetido a perdas o que faz com que o rendimento da planta seja muito inferior a 1.

### 2.2.2. Despacho Energético

Quando se trata das modalidades de contratação e operação das centrais termelétricas, encontram-se duas formas que visam atender as necessidades específicas do setor de energia elétrica: as de contrato por quantidade e as de disponibilidade (NETO, 2016).

A primeira modalidade é a mais comum. Nela, ambas as partes, gerador e comprador, realizam um contrato por quantidade em que o gerador é obrigado a entregar uma quantidade de energia firmada em contrato. Caso a geração não seja possível de se atingir, o gerador deve comprar energia no mercado livre de energia organizado pela CCEE e repassar ao consumidor, além de receberem uma multa da ANEEL.

Quanto a modalidade de contratação por disponibilidade, o objeto de negociação não é a propriamente a energia, e sim o uso de empreendimentos de

geração. Dessa forma, os geradores mantêm seu empreendimento disponível para geração, despachando a energia quando solicitado pela ONS, sendo os custos de compra de combustíveis repassados para os clientes.

As centrais termelétricas que operam em regime de disponibilidade apresentam uma grande importância ao SEP. A matriz energética brasileira é majoritariamente hídrica. Em épocas de secas o fornecimento fica comprometido. A ONS contata as térmicas de regime de disponibilidade para que ela possa completar a geração evitando um colapso no sistema.

### 2.3. Energia Eólica

Neste tópico é abordado as características do vento como vetor energético. Em seguida é mostrado o despacho da operação eólica.

#### 2.3.1. O Vento

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo das superfícies terrestre, devido ao fato da radiação solar incidente ser superior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares (CASTRO, 2003).

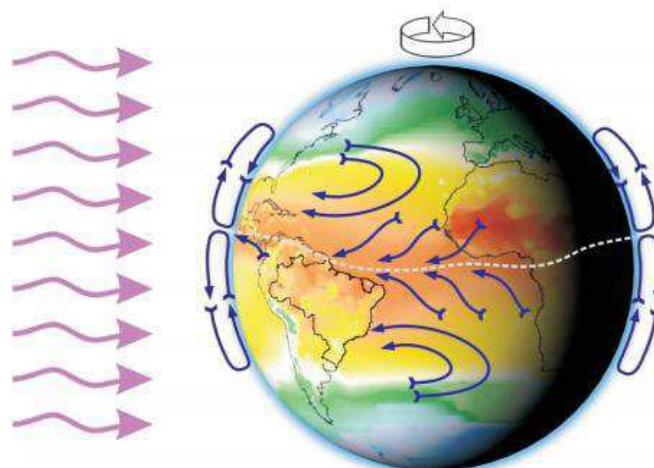
O sol aquece a superfície da terra de forma desigual, provocando fluxo de vento. O sol fornece energia na forma de radiação da qual em torno de  $1,39 \text{ KW/m}^2$  é recebida pela Terra (CUSTÓDIO, 2009).

A circulação geral do vento no Atlântico, região em que se encontra o Brasil, é mostrada na Figura 5, em que há a presença de duas importantes correntes, os ventos alísios e o anticiclone tropical sul.

Os ventos alísios são o contínuo movimento das massas de ar de superfície em direção às menores pressões da aquecida faixa equatorial. De acordo com o princípio de Coriolis, este movimento é contrário à rotação da Terra (RONALDO, 2009).

Já os ventos provocados pelo anticiclone tropical sul são causados por uma zona de alta pressão existente sobre o oceano Atlântico, entre a América do Sul e a África. Estes ventos definem a predominância na costa sul do Brasil.

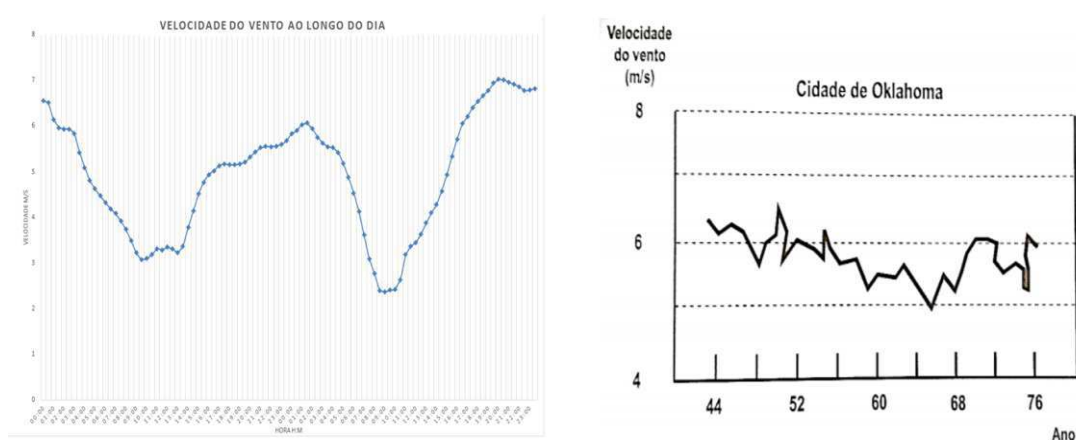
*Figura 5 - Circulação geral do ar no atlântico sul*



*Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001*

A principal vantagem por utilizar o vento como fonte de energia é o fato dele ser um recurso renovável. Contudo, a sua velocidade apresenta variações ao longo dos minutos, dias, meses e até mesmo do seu comportamento médio ao longo dos anos. Esse comportamento é ilustrado na Figura 6. À esquerda é caracterizado a variância do vento ao longo de um dia, enquanto que à direita é caracterizado a mudança do comportamento médio da velocidade do vento ao longo dos anos da cidade de Oklahoma.

*Figura 6 - Comportamento Variável da Velocidade do Vento*



*Fontes: Autoria Própria; Custódio, 2009*

É verificado que o vento apresenta uma característica estocástica e a sua velocidade é uma variável aleatória contínua (CUSTÓDIO, 2009).

Um meio viável de análise das condições da velocidade do vento é determinando a sua função de densidade de probabilidade, na qual é representado a sua probabilidade atingir certo valor.

Os registros da densidade de probabilidade ganham importância se puderem ser descritos através de alguma expressão analítica. A expressão matemática mais adequada à distribuição da velocidade do vento é a função de Weibull, dada pela seguinte formulação:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$c$  = fator de escala [m/s]

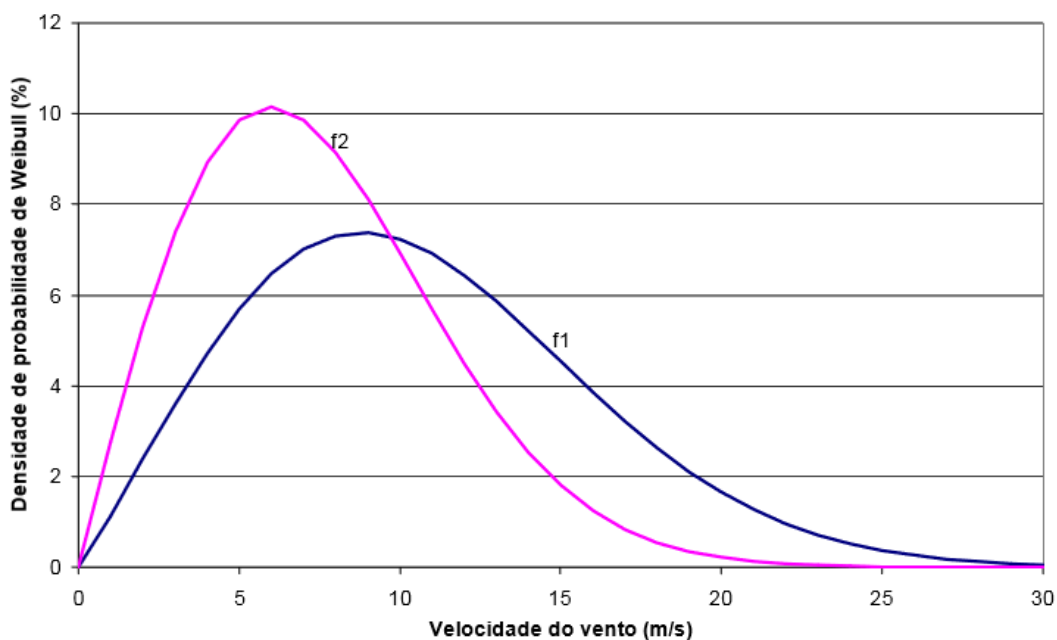
$k$  = fator de forma [adimensional].

O fator de escala,  $c$ , está associado com a velocidade média do vento caracterizado. Por sua vez, o fator de forma,  $k$ , está associado com a variância média da velocidade do vento em torno da velocidade média.

Verifica-se que ao aumentar o fator de forma, a função de Weibull é expandida em torno do eixo das ordenadas.

A seguir é apresentado duas funções típicas de densidade de probabilidade, para  $k_1 = 2,1$ ;  $c_1 = 12$  m/s;  $k_2 = 1,7$  e  $c_2 = 8$  m/s

Figura 7 - Densidade de Probabilidade do Vento



Fonte: CASTRO, 2003

### 2.3.2. Potencial Eólico

O vento é uma massa de ar em movimento, portanto apresenta uma energia cinética associada. A potência disponível que passa através de uma seção  $A$  transversal ao fluxo de ar é dada pela seguinte expressão:

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

Onde:

$P$  = potência do vento [W];

$\rho$  = massa específica do vento [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$A$  = área da seção transversal [ $\text{m}^2$ ].

O dispositivo responsável por converter a energia cinética do vento em energia mecânica é denominado Turbina Eólica, apresentado na Figura 8.



Figura 8 - Turbina Eólica



Fonte: direct industry, 2018

Como toda máquina elétrica, uma turbina eólica não consegue extrair toda a potência disponível do vento. Este fato é elucidado ao perceber que o vento continua a ter uma velocidade, e com isso uma potência associada, após sua passagem pelo diâmetro das pás do aerogerador.

Assim, a turbina consegue extrair uma parcela da potência total. O máximo valor possível é denominado de Máximo de Betz ou Coeficiente de Betz e equivale a 59,3% da potência eólica total.

Outro componente importante para a geração de energia elétrica a partir do vento é o gerador elétrico.

O gerador elétrico, acionado pela turbina, converte energia mecânica em energia elétrica por meio de conversão eletromagnética. O acoplamento entre a turbina e o gerador é feito através de caixas multiplicadoras (CUSTÓDIO, 2009).

A faixa de operação do gerador apresenta uma relação muito forte com a velocidade média do vento e por isso a eficiência depende de fabricante para fabricante. Dessa forma, informações sobre o comportamento local do vento é de extrema importância na determinação do modelo a ser escolhido para o parque eólico e na energia gerada.

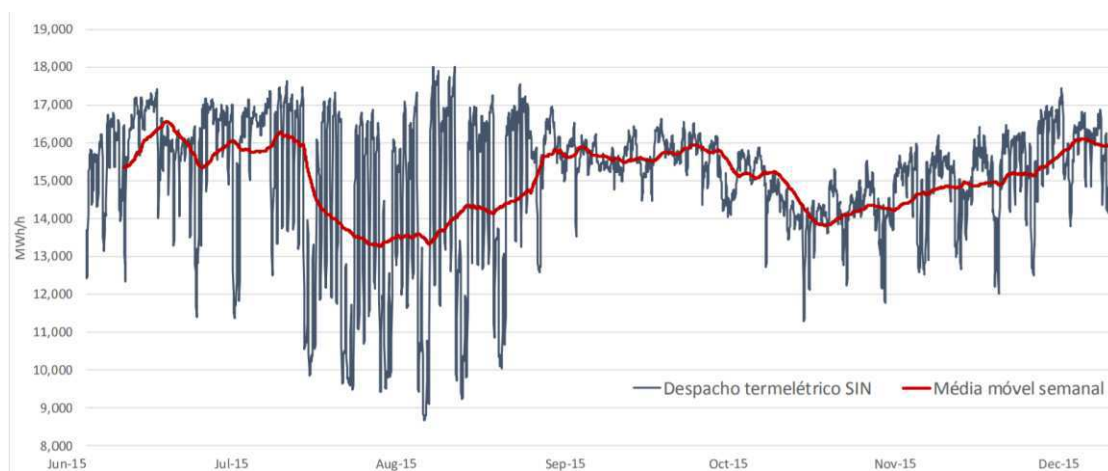
### 2.3.3. Despacho Energético

O fato da geração eólica ser intermitente, não controlável e de difícil previsibilidade prejudica o planejamento da operação por parte da ONS. Uma medida adotada por parte do Operador Nacional do Sistema é realizar inicialmente o despacho das fontes renováveis no SIN, eólica e solar, e compensar as flutuações a partir de hidrelétricas e termelétricas.

Na concepção original da inserção de energia eólica no Brasil, os reservatórios das hidrelétricas compensariam as flutuações das eólicas. Contudo, regiões como o Nordeste apresentam uma redução na capacidade de modulação hidroelétrico. Como resultado as termelétricas têm sido utilizadas para o fechamento do balanço energético (DALL'ORTO; BEZERRA; KELMAN; CARVALHO, 2017).

O comportamento da geração termelétrica durante o ano de 2015 é ilustrado na Figura 9, onde é evidenciado a grande oscilação na sua geração afim de compensar a eólica.

Figura 9 - Complementariedade da Geração Térmica frente à Eólica



Fonte: DALL'ORTO & ETAL, 2017

Uma melhor previsibilidade da velocidade do vento otimizaria o despacho energético como um todo de modo que o Operador Nacional está investindo em previsores, ferramenta que são capazes de fornecer informações sobre o comportamento dos ventos com antecedência de horas (BRAINMARKET, 2017).

Os previsores não acabam com a volatilidade da geração eólica, contudo, fornece informações mais precisas sobre o comportamento do vento, o que auxilia no despacho de centrais complementares.

#### 2.4. WindPro

Como mostrado anteriormente, a velocidade do vento apresenta rápidas oscilações em curtos intervalos de tempo. Como a potência de saída depende do cubo da velocidade, uma oscilação de 10% em torno do valor da velocidade representa uma oscilação de 33% da potência. Dessa forma, estas pequenas variações influenciam na energia geral, tornando informações como por exemplo valor médio do vento insuficientes para correta análise da viabilidade de um sítio eólico.

Para correta análise é necessário recorrer a meios computacionais para determinação da viabilidade. Uma dessas alternativas é o *WindPro*.

*WindPro* é um *software* de modelagem do vento desenvolvido pela empresa dinamarquesa *EMD International S/A* e é utilizado para *design* e planejamento de uma única turbina eólica e parques eólicos (ACKER, 2011).

O objetivo principal do *WindPro* é o cálculo do potencial eólico de um local baseado em algumas variáveis de entrada, tais como: dados de vento (em pontos representativos da região escolhida), orografia, obstáculos e rugosidade; além da simulação da energia gerada em uma ou mais turbinas através da curva de potência do gerador escolhido (CALDAS, 2010).

A licença do *software* é paga e fornece informações e dados sobre estações meteorológicas, satélites para *downloads* de relevos, além de dados dos principais fabricantes de aerogeradores.

Ele é composto por diversos módulos e é capaz de contabilizar as perdas do parque além de ser capaz de otimizar o *layout* e disposição das turbinas no terreno escolhido.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos, pode-se avaliar se o local em estudo proporciona uma corrente de vento mínima ou não para a gerar potência nas turbinas eólicas. Através das simulações é possível estimar o gasto para implementação do empreendimento, uma vez que é levantado parâmetros do projeto como área total, escolha do tipo, número e local de instalação das turbinas, potência gerada (ROSSETTO,2015).

### 3. MODELAGEM

Nesta seção será modelado duas centrais geradoras de energia elétrica com enfoque estrutural e econômico para os equipamentos que as compõem. A primeira será uma termelétrica em que é mostrado qual o seu tipo, qual a capacidade de geração e os elementos principais na conversão de energia. Por fim o mesmo estudo é levado para um parque eólico.

#### 3.1. Termelétrica

Como mencionado anteriormente, as centrais termoelétricas apresentam diferentes configurações. Para a análise da viabilidade econômica, opta-se por uma central à combustão interna devido a sua praticidade de funcionalidade.

O grupo motor-gerador empregado no modelo foi o modelo 18V32 fabricado pela WÄRTSILÄ Corporation. Os parâmetros deste motor são mostrados na Tabela 2.

*Tabela 2 - Parâmetros do Motor WÄRTSILÄ 18V32*

<b>Potência</b>	8.730 kW
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Combustível</b>	HFO ( <i>heavy fuel oil</i> )
<b>Rendimento (<math>\eta</math>)</b>	47%
<b>Velocidade</b>	720 rpm
<b>Dimensões</b>	13 x 3,3 x 4,3 m
<b>Preço</b>	R\$ 4.921.560,00

*Fonte: WÄRTSILÄ (2018)*

O motor 18V32 opera na condição de “*starts and stop*” que permite a central entrar em operação ou sair de operação de forma bastante rápida. Este regime é ideal para se trabalhar no regime de disponibilidade.

Uma característica importante é que o motor da central opera em ciclo diesel de quatro tempos e conforme ilustra a Tabela 2, o combustível utilizado é HFO (heavy fuel oil) ou óleo combustível pesado. No Brasil eles são divididos em dois grupos. O grupo “A” apresenta os óleos combustíveis com teor de enxofre maior que 1% e menor que 5,5% em relação ao peso total. Já o grupo “B” é formado pelos óleos com teor de enxofre menor que 1%. Ambos os grupos são divididos em 9 subgrupos onde o n°1 indica o combustível com menor viscosidade (FELIPE CUNHA, 2006).

Na modelagem do sistema foi escolhido o Óleo Combustível Tipo B1 (OCB1). As principais características do OCB1 estão dispostas na Tabela 3.

*Tabela 3 – Parâmetros do OCB1*

<b>Natureza Química</b>	Mistura de Hidrocarbonetos
<b>Taxa de Evaporação</b>	Muito lenta
<b>Densidade relativa a 20/4°C (<math>\rho</math>)</b>	0,968 g/cm <sup>3</sup>
<b>Enxofre total</b>	0,61% (massa)
<b>Viscosidade cinemática a 60°C</b>	400,01 cSt
<b>PCI</b>	39,1 kJ/g
<b>Valor (V)</b>	R\$ 2,058 / litro

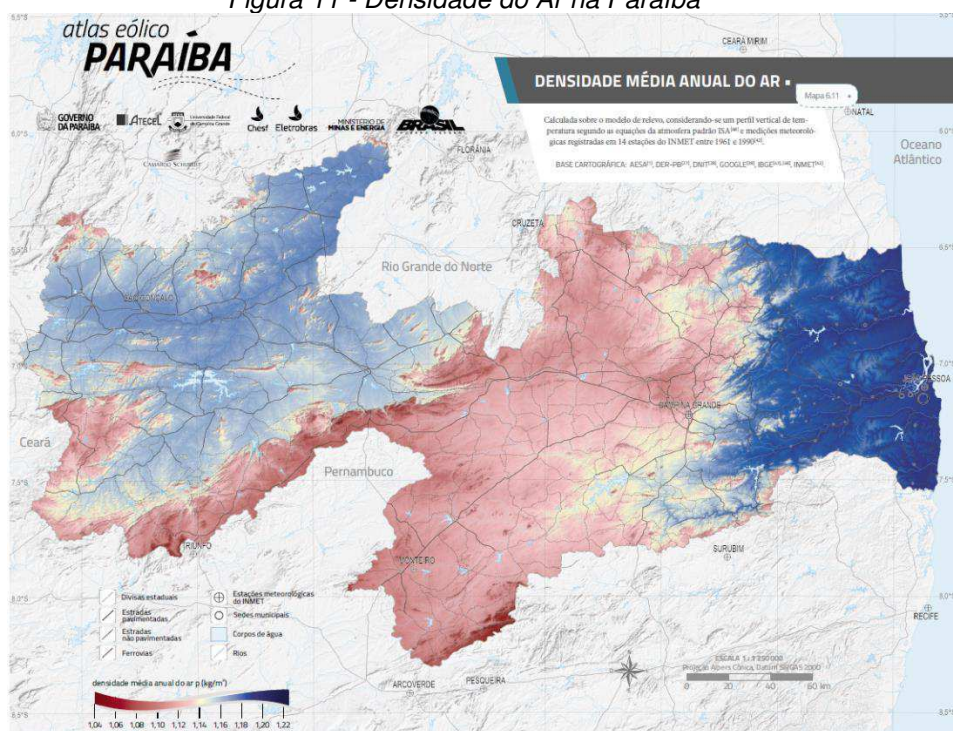
*Fonte: Associação Brasileira de Química (2015)*

O preço do litro do OCB1 foi retirado da cotação média do óleo combustível comercializado na bolsa de valores de Nova York em maio de 2018.

Após o grupo motor-gerador elétrico, a tensão é elevada por meio de dois transformadores trifásicos a uma tensão de 230 kV que se encontra em uma subestação própria da central termelétrica. Por fim, toda a energia gerada é fornecida ao SIN.



Figura 11 - Densidade do Ar na Paraíba



Fonte: Atlas Eólico Paraíba 2017

Tomando posse dos dados fornecidos pelas Figuras 10 e 11, opta-se pela implementação do parque eólico no litoral da Paraíba próximo cidade de Pitimbu. As coordenadas geográficas UTM (Universal Transversa de Mercator) da localidade são dadas por:

- Latitude = -7,41274
- Longitude = -34,8079

Após a localização ideal de um parque eólico, a próxima etapa é determinar o modelo do aerogerador. Algumas variáveis são determinantes no processo de escolha. A primeira é relacionada a potência. Cada modelo apresenta uma curva de potência própria em que a potência é dependente da velocidade. Dessa forma, deve-se levar em consideração a velocidade média do vento do local escolhido para otimizar o parque. O segundo refere-se à disponibilidade. Alguns modelos de aerogeradores não estão disponíveis no mercado brasileiro.

Através dessas considerações, escolhe um modelo da Siemens. Os dados do aerogerador estão dispostos na Tabela 4. Em seguida é possível visualizar na Figura 12 a respectiva curva de potência.

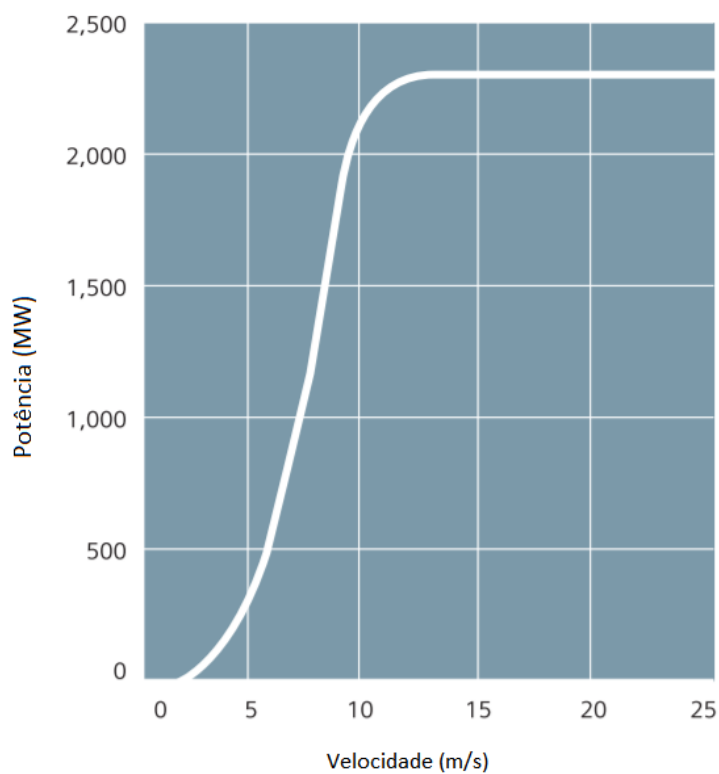


Tabela 4 - Parâmetros do aerogerador Siemens SWT 2.3-113

<b>Modelo</b>	<b>Siemens SWT 2.3-113</b>
<b>Potência Nominal</b>	2,3 MW
<b>Altura da Nacele</b>	99,5 m
<b>Comprimento da Pá</b>	55 m
<b>Área das Pás</b>	10.000 m <sup>2</sup>
<b>Intervalo de Velocidade</b>	12– 13 m/s
<b>Gerador</b>	Síncrono
<b>Tensão</b>	690 V
<b>Frequência</b>	60 Hz

Fonte: Siemens

Figura 12 - Curva de Potência Aerogerador Escolhido



Fonte: Siemens

O custo para uma turbina eólica varia em média de 1,3 a 2,2 milhões de dólares por MW de potência. Assumindo que a turbina que compõe o modelo do parque eólico apresenta uma potência de 2,3 MW, o custo assumido por unidade será de aproximadamente 3,4 milhões de dólares.

Segundo a Bolsa de Valores, a cotação do dólar americano no dia 27/07/2018 é de R\$ 3,72. Portanto, o preço unitário estimado da turbina eólica ( $V_{aero}$ ) utilizada no projeto é de R\$ 12.648.000,00.

O modelo do parque eólico utilizado para comparação com a termelétrica consta de 14 aerogeradores, totalizando uma potência instalada de 32,2 MW.

Após o gerador, um transformador trifásico é responsável por elevar a tensão para 230 kV. Como o parque eólico está distante 15 km de uma subestação da concessionária de energia, é necessário a construção de uma linha de transmissão para fluir a potência. Segundo a ANEEL, o preço médio da construção de uma linha depende de dois fatores: distância e nível de tensão. A Tabela 5 ilustra o custo.

*Tabela 5 – Custo Associados à construção de Linha de Transmissão*

<b>Nível de Tensão (kV)</b>	<b>Custo adotado (R\$ × 1000 / km)</b>
<b>765</b>	429,68
<b>500</b>	314,51
<b>440</b>	294,45
<b>345</b>	202,35
<b>230</b>	125,31

*Fonte: ANEEL 2007*

Dessa forma, o custo para a construção da linha de transmissão que interliga o parque eólico a uma subestação de energia é:

$$C_{LT} = R\$ 125.310 \times 15$$

$$C_{LT} = R\$ 1.879.650,00$$

Onde:

$C_{LT}$  = custo da linha de transmissão

Além do aerogerador, transformador trifásico e linha de transmissão, o projeto de um parque eólico envolve custo de outros componentes como custos de análise, equipamento meteorológicos. Contudo, estes equipamentos não entraram na análise por apresentarem um valor bem inferior aos demais.

No Capítulo seguinte será analisado a relação custo/benefício da implementação de um parque eólico perante uma termelétrica a partir da modelagem feita utilizando as características já comentadas de cada e a simulação no WindPRO.

## 4. ANÁLISES DOS DADOS DO WINPRO

Neste capítulo é analisado, a partir do *software* WindPrO, a energia anual gerada pelo parque eólico modelado. Para tanto, foi realizada medições *in loco* da velocidade do vento. Posteriormente, levanta-se os custos necessários para gerar este mesmo montante via central termelétrica e após compara-se qual dos dois vetores energéticos proporcionam o melhor custo benefício.

### 4.1. Medições do Vento

Idealmente, a caracterização do recurso eólico num local deve ser feita com base em medições realizadas em vários pontos da zona envolvente e ao longo de um número significativo de anos. Na prática, a falta de tempo e de recursos financeiros leva a que as decisões sejam muitas vezes baseadas num único registo medido ao longo de apenas um ano (RUI CASTRO, 2003).

A medição do vento é feita com instrumentação específica: anemômetros e sensores de direção. É essencial que a instrumentação esteja bem exposta a todas as direções do vento, isto é, os obstáculos devem estar situados a uma distância de, pelo menos, dez vezes a sua altura (ATLAS EÓLICO PARAÍBA, 2017).

Dessa forma, instrumentos capazes de executar medições acerca da velocidade e direção do vento foram instalados no local determinado. As medições foram realizadas a 80 metros de altura do solo em intervalos regulares de 30 minutos ao longo do ano de 2007. Os instrumentos similares para medição das grandezas são ilustrados através da Figura 13. A esquerda tem-se o *windvane*, responsável pela medição da direção do vento, a direita tem-se o anemômetro de copo, responsável pela medição da velocidade.

Figura 13 – Windvane e Anemômetro de copo



Fonte: Vector Instruments

Os dados foram dispostos em forma de tabela e posteriormente serviram como base para a análise energética do projeto.

#### 4.2. Simulações WindPro

Com os parâmetros do vento obtidos ao longo de todo ano é possível realizar a simulação no WindPro e com isso obter a EAG (Energia Anual Gerada), a curva de Weibull, distribuição do vento ao longo das horas e meses, eficiência de cada turbina e fator de capacidade do parque eólico.

Inicialmente insere o mapa do local onde será instalado as torres com os aerogeradores. A partir da localização e de dados sobre o terreno, como a rugosidade e obstáculos, o *software* consegue realizar uma estimativa da característica do vento ao longo de todo o sítio. O terreno selecionado é mostrado na Figura 14 e os valores de rugosidade utilizados para a simulação estão dispostos no formato da Tabela 6.

Figura 14 - Vista do local para implementação do parque eólico



Fonte: Google Maps

Tabela 6 – Faixa de Rugosidade para Cobertura do Solo

<b>Tipo de Cobertura e/ou uso da terra</b>	<b>Faixa de Rugosidade Z0 [m]</b>
<b>Caatinga</b>	0,1 – 0,4
<b>Culturas agrícolas</b>	0,02 – 0,1
<b>Pastagens</b>	0,02 – 0,05
<b>Solo exposto</b>	0,001 – 0,01

Fonte: Atlas Eólico do Estado da Paraíba

Em seguida, realizou os seguintes procedimentos:

- Alocação de 14 aerogeradores do fabricante e modelo escolhido ao longo do mapa;
- Importa os dados do vento;
- Escolha do método de simulação.

O método de análise escolhido foi o PARK em que é estimado as condições do vento para cada aerogerador distinto além de calcular as perdas pela interferência entre as turbinas, apresentando resultados com um maior grau de precisão.

Enfim, gera-se dois relatórios. O primeiro apresenta um enfoque energético enquanto que o segundo apresenta as características do vento (velocidade média, rosas do vento, distribuição de Weibull) cujas imagens estão presentes no Apêndice A deste trabalho.

Do primeiro relatório, é obtido os seguintes dados:

- Energia Bruta (sem perdas): 126.182 MWh/ano;
- EAG: 52.348,3 MWh;
- Eficiência do Parque: 41,5%;
- Fator de Capacidade: 16,7%
- Resultado Médio por Aerogerador: 3.365,2 MWh/ano;
- Horas de Plena Carga: 1.463;
- Velocidade Média do Vento: 6,8 m/s

#### 4.3. Comparação Termelétrica

Considerando um motor de combustão interna com as características já dimensionadas, será determinado o volume, e conseqüentemente o custo atribuído à geração termelétrica afim de gerar a mesma energia do parque eólico.

Como visto, tem-se que:

- $PCI_{OCB1} = 39,1 \text{ kJ/g}$
- $\rho_{OCB1} = 0,968 \text{ g/cm}^3 = 968 \text{ g/litro}$
- $V_{OCB1} = R\$ 2,058 / \text{litro}$
- $\eta_{motor} = 0,47 = 47\%$

Para realizar a conversão de kJ para MWh deve-se inicialmente dividir por 3.600 s/h e posteriormente 1000:

$$1 \text{ kJ} = \frac{1}{3600} \text{ kWh} = 0,277 \times 10^{-3} \text{ kWh} = 0,277 \times 10^{-6} \text{ MWh}$$

Dessa forma, tem-se que o volume necessário para geração equivalente de energia é dado por:

$$volume = \frac{EAG}{\eta} \times \frac{1}{PCI_{OCB1}} \times \frac{1}{\rho_{OCB1}} \times \frac{10^6}{0,277}$$

$$volume = \frac{52.348,3}{0,47} \times \frac{1}{39,1} \times \frac{1}{968} \times \frac{10^6}{0,277}$$

$$volume = 10.623.627,66 \text{ litros}$$

Ou seja, é necessário a combustão de 10.623.627,66 litros do Óleo Combustível B1 para gerar energia equivalente ao parque eólico modelado. E o valor associado é:

$$valor_{comb} = V_{OCB1} \times volume$$

$$valor_{comb} = R\$ 2,058 \times 10.623.627,66$$

$$valor_{comb} = R\$ 21.863.425,724$$

Contudo, uma das principais vantagens da usina termelétrica modelada é sua capacidade de gerar esse valor energético em um intervalo de tempo inferior ao necessário pela fazenda eólica.

Supõe que a termelétrica opera 24 horas por dia. Sabendo que o motor de combustão apresenta uma potência de 8.730 kW = 8,73 MW. A quantidade de dias necessários para gerar 52.348,3 MWh é dada por:

$$tempo = \frac{EAG}{P \times horas}$$

$$tempo = \frac{52.348,3}{8,73 \times 24} = \frac{52.348,3}{209,52}$$

$$tempo = 250 \text{ dias}$$



Dessa forma é necessário que a central termelétrica opere 250 dias para gerar a energia equivalente de 365 dias de operação da usina eólica. Ou seja, ela necessita de 68% do tempo para gerar a mesma quantidade.

#### 4.4. Análises de Custos

O desenvolvimento de um empreendimento é pautado principalmente nos custos e no prazo para o seu retorno.

Em uma carta de projetos, o responsável pela escolha de um entre os projetos ofertados opta por aquele que proporciona os menores custos ou que o seu retorno financeiro se dá de forma mais rápida.

Pode-se entender custos como a soma de todos os gastos incorridos e necessários para a aquisição e conversão da matéria prima. Dessa forma, os custos de um projeto apresentam duas classificações:

- Custos fixos;
- Custos variado.

Os custos fixos estão relacionados com a compra de equipamentos indispensáveis para o funcionamento. Já os custos variados são dependentes da geração.

Para o parque eólico não há custos variados uma vez que o recurso utilizado, o vento, é renovável. Assim, os custos para sua implementação se resumem a compra dos aerogeradores e da construção da linha de transmissão. O seu valor pode ser dado por:

$$custos_{eolica} = n \times V_{aero} + C_{LT}$$

Onde:

$n$  = número de aerogeradores do projeto;

$V_{aero}$  = valor unitário do aerogerador;

$C_{LT}$  = custo da construção da linha de transmissão.

Utilizando os valores calculados e estimados, tem-se:

$$custos_{eolica} = 14 \times R\$ 12.648.000,00 + R\$ 1.879.650,00$$

$$custos_{eolica} = R\$ 178.951.650,00$$

No caso da termelétrica, a geração é dependente do volume de combustível utilizado. Portanto os custos fixos estão associados com a compra do grupo motor-gerador dimensionado e os custos variáveis com o volume do OCB1 necessário.

Considera-se que em um ano será gerado pela termelétrica o equivalente a EAG do parque eólico modelado. Assim, os custos são:

$$custos_{termo} = custos_{fixos} + custos_{variáveis}$$

$$custos_{termo} = valor_{motor} + q \times valor_{comb}$$

$$custos_{termo} = R\$ 4.921.560,00 + q \times R\$ 21.863.425,724$$

Onde a variável  $q$  indica a quantidade de anos de operação da termelétrica.

Para a construção do empreendimento eólico modelado se tornar economicamente viável face à termelétrica é necessário que os seus custos sejam inferiores. Portanto, tem-se:

$$custos_{eolica} < custos_{termo}$$

$$R\$ 178.951.650,00 < R\$ 4.921.560,00 + q \times R\$ 21.863.425,724$$

$$\$ 174.030.090,00 < q \times R\$ 21.863.425,724$$

$$q > 7,96$$

Portanto, o empreendimento eólico nos moldes da modelagem se torna economicamente viável, com relação aos custos térmicos, em 8 anos.

## 5. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas é possível concluir que a energia eólica, ao longo do tempo, apresenta uma evolução quanto a sua competitividade e hoje um projeto, com base nas modelagens realizadas, se torna financeiramente viável em torno de 8 anos, intervalo este curto visto que a energia eólica provém de fonte renovável e é duradoura, fato não compartilhado pelas usinas termelétricas, que além do custo associado a compra do OCB1, há a liberação de gases poluentes associados ao seu processo de geração. Portanto, a substituição de um projeto termelétrico por um eólico equivalente é viável economicamente, em um curto espaço de tempo o investimento inicial consegue ser pago.

Nota-se que um parque eólico composto por 14 aerogeradores pode ser substituído, energeticamente, por apenas um conjunto motor-gerador modelado. Além do mais, a energia termelétrica consegue fornecer tal demanda em um intervalo de tempo menor que o fornecido pelo parque eólico.

Assim, fica claro que a utilização das termelétricas é indispensável devido a sua rápida resposta frente as variações de cargas inerentes ao sistema elétrico, característica esta não encontrada na energia eólica que apresenta um comportamento probabilístico.

Possíveis melhorias a serem realizadas no projeto é a simulação do parque eólico em locais com um maior potencial eólico. No caso do estado Paraíba um possível local seria no município de Santa Luzia, que apresenta índices superiores à região litorânea escolhida, segundo o Atlas Eólico da Paraíba. Uma segunda melhoria é a simulação com diferentes modelos de aerogeradores. A terceira melhoria é a otimização do parque eólico que pode ser feita com a versão mais atual do *software* WindPRO.

É importante ressaltar a importância do trabalho em tratar de temas que apresentam uma grande relevância para o cenário energético nacional. Sempre haverá discussões acerca de qual fonte é mais vantajosa. O trabalho tentou apresentar um viés econômico em relação aos custos e conseguiu alcançar os seus objetivos.

## REFERÊNCIAS

CASTRO, R. M. G. *Energias renováveis e produção descentralizada – Introdução à energia eólica*. 1. ed. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2003.  
Acesso em: 18 jun. 2018.

COELHO, P. Usinas termoeletricas – A energia da combustão, jun. 2015.  
Disponível em <<http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/usinastermoeletricas-energia-combustao.html>>.  
Acesso em: 18 jun. 2018.

ABRAGET. *A Importância da participação da geração térmica a carvão mineral, nos leilões A-5*. Rio de Janeiro: 2011.  
Disponível em <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/063/contribuicao/abraget\\_ap\\_063\\_2011.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/063/contribuicao/abraget_ap_063_2011.pdf)>  
Acesso em: 18 mai. 2018.

EPE. *Leilões de geração A-6/2017*. Rio de Janeiro: 2017.  
Acesso em: 25 mai. 2018

EPE. *Leilões de energia nova de 2017*. Rio de Janeiro: 2017.  
Acesso em: 25 mai. 2018

VICHI, F. M; Mansor, M. C – Energia, meio ambiente e economia: O Brasil no contexto mundial. Química Nova, São Paulo, Volume 32, No. 3, 757-767, 2009.  
Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n3/a19v32n3.pdf> >  
Acesso em: 25 mai. 2018

ONS. *Resultados da Operação*. Disponível em:  
<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>  
Acesso em 25 mai. 2018

FURNAS. *Página Institucional*. Disponível em:  
<[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_term\\_funciona.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_term_funciona.asp)>  
Acesso em 27 mai. 2018

CALDAS, D. M. *Estudo do potencial eólico e estimativa de geração de energia de um projeto eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando o WindPro e o WAsP*. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.  
Acesso em 10 jun. 2018

REIS, L. B. Geração termelétrica: *conceitos básicos, configurações, potência gerada e energia produzida*. 2012

Acesso em 10 jun. 2018

SOARES, F. H. N. *Operação de usinas térmicas contratadas por disponibilidade: uma avaliação dos impactos setoriais sob as óticas técnicas, econômica e financeira*. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Energia e Automação Elétricas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

Acesso em 10 jun. 2018

ACKER, T; CHIME, A. H. *Wind modeling using WindPRO and WAsP software*. Universidade Arizona do Norte, 2011. Disponível em:

<[https://nau.edu/uploadedFiles/Academic/CEFNS/Centers-Institutes/Folder\\_Templates/Media/wind-modeling-using-WindPro-and-WAsP-software.pdf](https://nau.edu/uploadedFiles/Academic/CEFNS/Centers-Institutes/Folder_Templates/Media/wind-modeling-using-WindPro-and-WAsP-software.pdf)>

Acesso em 10 jun. 2018

DALL'ORTO, C; BASTOS, J. P; BEZERRA, B; CARVALHO, M. R; KELMAN, R; PEREIRA, M. V. *Necessidade de reserva girante e impactos no SIN devido à inserção de geração intermitente*. Curitiba, 2017. Disponível em:

<<http://xxivsnptee.com.br/wp-content/uploads/2017/11/GOP15.pdf>>

Acesso em 17 jun. 2018

BRAINMARKET. *Página Institucional*. Disponível em:

<<http://www.brainmarket.com.br/noticia/ons-aposta-em-previsores-para-melhorar-operacao-eolica>>

Acesso em 17 jun. 2018

USP&E. *Página Institucional*. Disponível em:

<<http://www.uspowerco.com/new/hfo-generators/man-8959.htm>>

Acesso em 24 jun. 2018

WARTSILA. *Página Institucional*. Disponível em:

<<https://www.wartsila.com/products/power-plants/solutions/liquid-fuel-power-plants/wartsila-32-liquid-fuel-power-plant>>

Acesso em 24 jun. 2018

GRAMEYER. *Página Institucional*. Disponível em:

<<http://www.grameyer.com.br/obras/obra-demo-1>>

Acesso em 24 jun. 2018

SIEMENS. *Página Institucional*. Disponível em:

<[https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-generation/wind-power/SWT-2.3-113-product-brochure\\_EN.pdf](https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-generation/wind-power/SWT-2.3-113-product-brochure_EN.pdf)>

Acesso em 24 jun. 2018

MENEZES, L.C; OLIVEIRA, D.S.; SILVA, M.A.P; SILVA, G.C.; MARQUES, E.P.; ROLEMBERG, M.P.; MARQUES, A.L.B.; LACERDA, C.A. *Avaliação da qualidade de óleos*

*combustíveis pesados utilizados em usinas termelétricas*. 55º Congresso Brasileiro de Química, Goiás, 2015. Disponível em:

<<http://www.abq.org.br/cbq/2015/trabalhos/4/8288-21602.html>>

Acesso em 30 jun. 2018

*Windustry*. Disponível em:

<[http://www.windustry.org/how\\_much\\_do\\_wind\\_turbines\\_cost](http://www.windustry.org/how_much_do_wind_turbines_cost)>

Acesso em 2 jul. 2018

*Melhor cambio*. Disponível em:

<<https://www.melhorcambio.com/dolar-hoje>>

Acesso em 16 jul. 2018

INDEXMUNDI. *Página Institucional*. Disponível em:

<<https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=%C3%B3leo-combust%C3%ADvel&meses=12&moeda=brl>>

Acesso em 16 jun. 2018

Aneel. *Metodologia para cálculo das tarifas e encargos de uso do sistema de transmissão*.

Acesso em 16 jul. 2018

*Generating Electricity for the Nation*. Disponível em:

<<http://www.mstworkbooks.co.za/technology/gr8/gr8-technology-20.html>>

Acesso em 20 jul. 2018

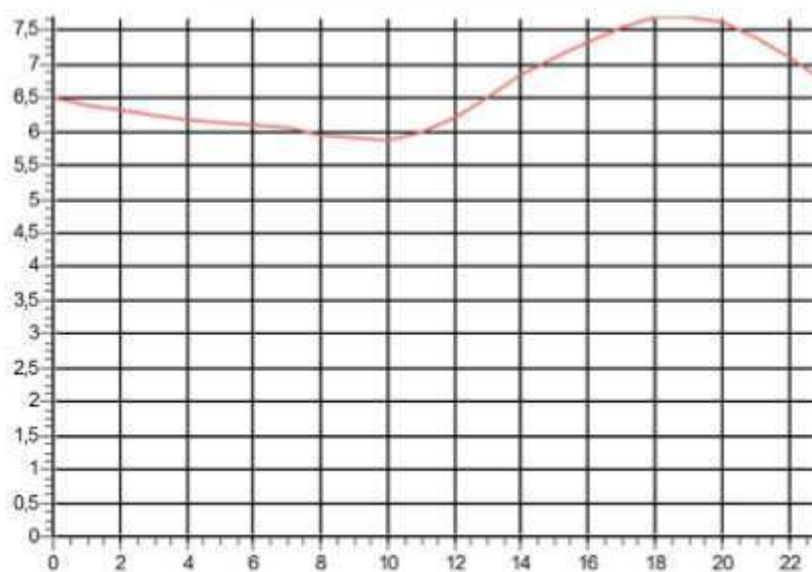
*Direct Industry, Turbina eólica*. Disponível em:

<<http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/turbina-eolica-73614.html>>

Acesso em 20 jul. 2018

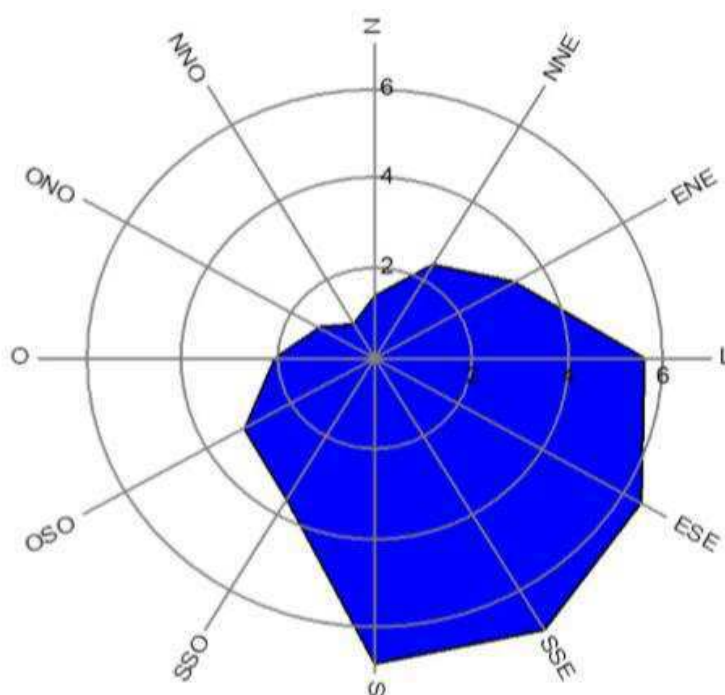
## APÊNDICE A

Figura 15 - Velocidade Média Horária do Vento



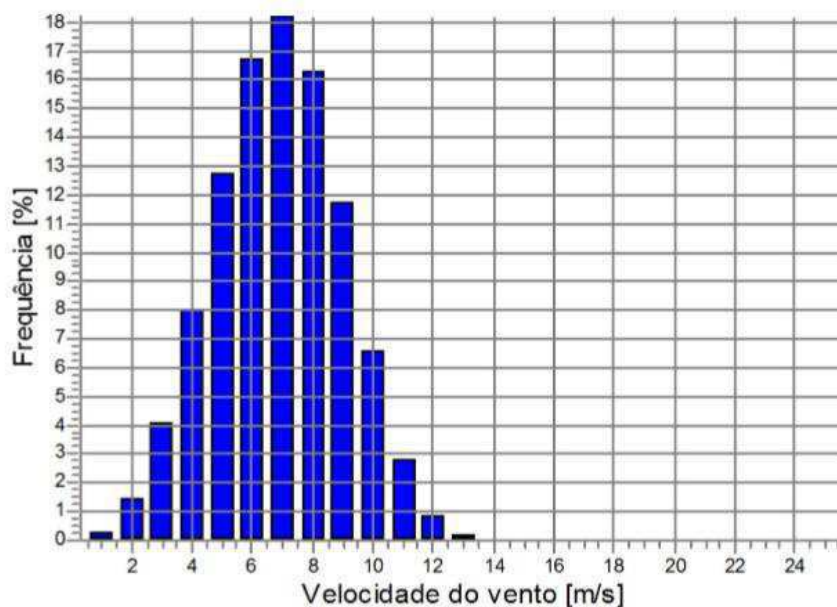
Fonte: o próprio autor

Figura 16 - Velocidade/Direção do vento



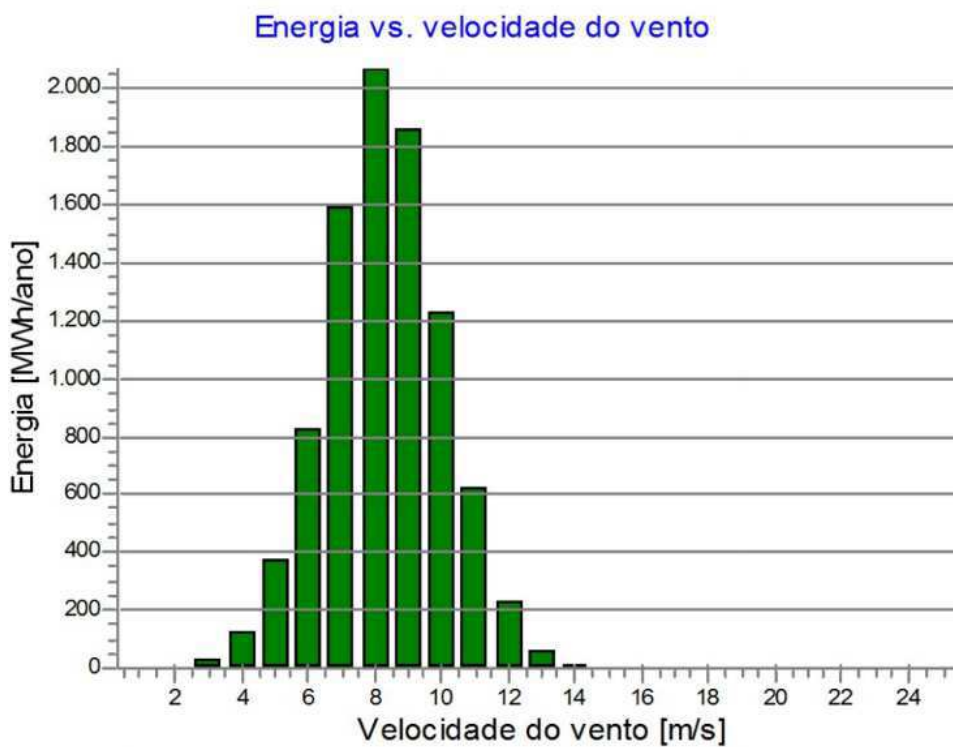
Fonte: o próprio autor

Figura 17 - Distribuição de Weibull



Fonte: o próprio autor

Figura 18 - Energia x Velocidade do vento (para uma turbina)



Fonte: o próprio autor



Tabela 7 - Energia Gerada por Aerogerador

<b>Aerogerador</b>	<b>Modelo</b>	<b>Potência [kW]</b>	<b>Energia Gerada [MWh]</b>
1	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	2.217,7
2	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	731,4
3	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	1.221,7
4	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	2.144,5
5	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	3.554,8
6	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	7.756,7
7	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	2.209,4
8	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	2.852,8
9	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	4.312,6
10	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	9.002,4
11	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	7.852,5
12	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	3.741,6
13	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	2.555,6
14	Siemens SWT-2.3-113-2.300	2.300	2.194,4

*Fonte: o próprio autor*