

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
MARIA CAMILA DE QUEIROZ SILVA

MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA PARA ATENDIMENTO DA  
DEMANDA RESIDENCIAL DA CIDADE DO ENCANTO / RIO GRANDE  
DO NORTE

SÃO PAULO  
2017

MARIA CAMILA DE QUEIROZ SILVA

MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA PARA ATENDIMENTO DA  
DEMANDA RESIDENCIAL DA CIDADE DO ENCANTO / RIO GRANDE  
DO NORTE

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada da Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Especialista em Energias  
Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência  
Energética.

Orientador:  
Prof. Dr. Demétrio Cornílios Zachariadis

SÃO PAULO

2017

Dedico este trabalho ao meu primo Ernandes, que se interessou pelo assunto desde o início, e ao meu namorado Danilo, que me apoiou bastante.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar até aqui e por todas as bênçãos em minha vida, por me dá forças para continuar em frente quando eu mais precisava.

Agradeço a minha família, principalmente a minha mãe Antonia e a minha tia Damiana por acreditar e confiar em mim, estando ao meu lado quando as coisas ficam difíceis. Ao meu irmão Diego, por me ver como um exemplo, mesmo eu achando isso demais. Ao meu namorado Danilo, por toda a ajuda e apoio que me proporciona, sendo meu grande amigo e companheiro. Aos meus amigos, que estão sempre ao meu lado, me dando muito apoio, mesmo que seja discordando de mim.

Agradeço ao corpo docente do curso de Energias Renováveis da USP, por todo o conhecimento transmitido no decorrer destes 2 anos, em especial ao prof. Demétrio pela orientação e ajuda com a monografia.

Também gostaria de agradecer aos funcionários da COSERN, em especial ao Reynaldo, pela ajuda com algumas informações descritas no trabalho e apoio.

“A única forma de chegar ao impossível é acreditar que é possível”. ALICE NO PAÍS DAS MARAVILHAS

## RESUMO

Este estudo visa contribuir com o desenvolvimento teórico de fonte de energia eólica para pequenos centros urbanos, em decorrência ao crescente aumento de consumo, a escassez de água nos reservatórios hidrelétricos e os novos acordos internacionais, que objetivam substituir fontes energéticas como as termoeletricas, por fontes de energias renováveis, como a solar, eólica e biocombustíveis, e deverão ser cumpridos até 2030. Essas pequenas cidades são prejudicadas nos casos de cortes emergenciais e racionamentos para suprir a alta demanda dos grandes centros urbanos, onde o centro de carga encontra-se no Sudeste, em especial, em São Paulo. Adotou-se uma cidade do interior da região Nordeste, mais precisamente, uma que fica próximo da divisa do Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE), onde desenvolveu-se as análises de dimensionamentos baseados no potencial dos ventos e o consumo residencial anual da cidade. Esta análise tem como finalidade verificar uma alternativa de produção independente e ao mesmo tempo interligada a rede, através de microgeração de energia eólica, para que a população da cidade possa ter uma estabilidade energética e consequentemente, um crescimento per capita maior. O resultante está diretamente do ligado a velocidade dos ventos anual e ao tipo de equipamento utilizado, porém a região não é muito boa para um parque, mostrando-se inviável um projeto em larga escala.

Palavras-chave:

Energia Eólica. Aerogeradores. Potencial Elétrico. Potencial Eólico. Rio Grande do Norte.

## ABSTRACT

The research will contribute to the theoretical development of wind energy to small cities, it is due the growing of demand, the shortage of water in the hydroelectric tanks and the new international agreements, they intend to substitute energy sources such as thermoelectric to renewables sources energy, for example, solar, wind and biofuels energy, these agreements must be fulfilled until 2030. The small cities are harmed in case of emergency situations and rationing required to provision energy the big cities, where the demand for energy is high, in special, São Paulo. It was chosen a country town from Northeast region, between the Rio Grande do Norte (RN) and Ceará (CE), where it was developed a dimensional analysis based on the wind potential and the annual energy demand of the city. The analysis has the objective to provide an alternative to energy production and at the same time interconnected with the energy network, through of microgeneration of wind energy, the result is an energy stability to the city and as consequence, a higher per capita growth. The resulting is directly connected with the annual wind speed and the equipment type used, however the region cannot be considered satisfied to a wind park, showing itself not feasible to a project with a large scale.

Key-words: Wind Energy, Wind Turbines, Electric Potential, Wind Potential. Rio Grande do Norte.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1: Componentes do aerogerador .....  | 27 |
| Figura 3.1: Procedimentos e etapas de acesso .....                                  | 34 |
| Figura 4.1: Características geográficas do Estado do Rio Grande do Norte .....      | 36 |
| Figura 4.2: Precipitação média Anual do Estado do Rio Grande do Norte.....          | 37 |
| Figura 4.3: Precipitação média trimestral do Estado do Rio Grande do Norte .....    | 37 |
| Figura 4.4: Temperatura média Anual do Estado do Rio Grande do Norte.....           | 38 |
| Figura 4.5: Temperatura média trimestral do Estado do Rio Grande do Norte .....     | 38 |
| Figura 4.6: Mesorregiões do Estado do Rio Grande do Norte.....                      | 39 |
| Figura 4.7: Fator de forma de Weibull Anual do Estado do Rio Grande do Norte .....  | 41 |
| Figura 4.8: Rosa dos Ventos Anual do Estado do Rio Grande do Norte.....             | 42 |
| Figura 4.9: Potencial Eólico a 50 m de altura do Estado do Rio Grande do Norte .... | 43 |
| Figura 4.10: Potencial Eólico a 75 m de altura do Estado do Rio Grande do Norte ..  | 43 |
| Figura 4.11: Potencial Eólico a 100 m de altura do Estado do Rio Grande do Norte    | 44 |
| Figura 4.12: Localização de Encanto no Rio Grande do Norte .....                    | 45 |
| Figura 4.13: Cidade do Encanto, ao fundo o açude .....                              | 46 |
| Figura 5.1: Turbina SA-70 .....   | 53 |



## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 3.1: Número de conexões por fonte.....  | 31 |
| Gráfico 3.2: Potência Total Instalada (kW).....   | 32 |
| Gráfico 4.1: Índices de Continuidade da COSERN (Rio Grande do Norte).....   | 40 |
| Gráfico 4.2: Capacidade Instalada do Rio Grande do Norte .....  | 41 |
| Gráfico 4.3: Comportamento da chuva e da temperatura ao longo do ano da cidade do Encanto .....                       | 46 |
| Gráfico 4.4: Consumo por setor de atendimento do ano de 2015.....   | 47 |
| Gráfico 4.5: Consumo dos últimos 3 anos da cidade do Encanto .....  | 48 |
| Gráfico 4.6: Consumo residencial dos últimos 3 anos da cidade do Encanto .....  | 49 |
| Gráfico 5.1: Velocidade Média Sazonal de Vento a 50 m de Altura [m/s] para a cidade do Encanto .....                  | 51 |
| Gráfico 5.2: Função de Distribuição de Weibull.....   | 52 |
| Gráfico 5.3: Curva de potência nominal da turbina SA-70 .....   | 54 |
| Gráfico 5.4: Variação do Coeficiente de Potência .....  | 56 |
| Gráfico 5.5: Curva de densidade de potência .....   | 58 |
| Gráfico 5.6: Fluxo de caixa x Valor Presente Líquido do Cenário Realista .....  | 65 |
| Gráfico 5.7: Fluxo de caixa Simples x Acumulado do Cenário Realista .....   | 66 |
| Gráfico 5.8: Fluxo de caixa x Valor Presente Líquido do Cenário Otimista .....  | 67 |
| Gráfico 5.9: Fluxo de caixa Simples x Acumulado do Cenário Otimista .....   | 68 |
| Gráfico 5.10: Fluxo de caixa x Valor Presente Líquido do Cenário Pessimista.....                                      | 69 |
| Gráfico 5.11: Fluxo de caixa Simples x Acumulado do Cenário Pessimista.....   | 70 |
| Gráfico 5.12: Comparação de Consumo e do preço do kWh entre tarifas de Residencial e Residencial de Baixa Renda ..... | 72 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1: Diferenças entre três modelos de turbinas eólicas .....      | 25 |
| Tabela 3.1: Níveis de tensão considerados para conexão de centrais. .... | 33 |
| Tabela 5.1: Dados de vento a 50 m de altura da cidade do Encanto .....   | 50 |
| Tabela 5.2: Distribuição de Weibull .....                                | 52 |
| Tabela 5.3: Configuração da turbina SA-70 .....                          | 53 |
| Tabela 5.4: Desempenho da turbina SA-70 .....                            | 54 |
| Tabela 5.5: Produção de energia anual da turbina SA-70 .....             | 55 |
| Tabela 5.6: Coeficiente de potência .....                                | 57 |
| Tabela 5.7: Variação na velocidade do vento.....                         | 59 |
| Tabela 5.8: Fluxo de caixa do Cenário Realista .....                     | 65 |
| Tabela 5.9: Resultado do Cenário Realista .....                          | 66 |
| Tabela 5.10: Fluxo de caixa do Cenário Otimista.....                     | 67 |
| Tabela 5.11: Resultado do Cenário Otimista.....                          | 68 |
| Tabela 5.12: Fluxo de caixa do Cenário Pessimista.....                   | 69 |
| Tabela 5.13: Resultado do Cenário Pessimista.....                        | 70 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |   |
|-----------|---|
| A.C.      | Antes de Cristo   |
| ANEEL     | Agência Nacional de Energia Elétrica                                  |
| AP        | Audiência Pública   |
| CONFINS   | Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social                |
| COP       | Conferência das Partes  |
| COSERN    | Companhia Energética do Rio Grande do Norte                           |
| CRESESB   | Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito         |
| DEC       | Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora            |
| DVES      | Associação Dinamarquesa dos Engenheiros de Energia Eólica             |
| EP        | Produção de energia anual   |
| EUA       | Estados Unidos da América   |
| $FC_t$    | Fluxo de Caixa Líquido na data “t”                                    |
| FEC       | Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora         |
| GD        | Geração Distribuída   |
| HAWT      | Horizontal Axis Wind Turbine (Turbina de eixo horizontal)             |
| IBGE      | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                       |
| ICMS      | Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços                    |
| $I_0$     | Investimento Inicial  |
| ONS       | Operador Nacional do Sistema Elétrico                                 |
| OPEP      | Organização dos Países Exportadores de Petróleo                       |
| PIS       | Programa de Integração Social   |
| PRODIST   | Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional |
| PROEÓLICA | Programa Emergencial de energia Eólica                                |
| PROINFA   | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica      |
| REN       | Resolução Normativa   |
| RN        | Rio Grande do Norte   |
| SIN       | Sistema Interligado Nacional  |
| TIR       | Taxa Interna de Retorno   |
| TMA       | Taxa Mínima de Atratividade   |
| TSR       | Tip Speed Ratio (Relação entre a velocidade do vento e das pás)       |
| VAWT      | Vertical Axis Wind Turbine (Turbina de eixo vertical)                 |

|     |                           |
|-----|---------------------------|
| VP  | Valor Presente            |
| VPL | Valor Presente Líquido    |
| VR  | Valor Residual do projeto |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                     |  |
|---------------------|--|
| $^{\circ}\text{C}$  | Graus Celsius                            |
| A                   | Área                                     |
| $A_P$               | Área total ocupada pela fazenda eólica   |
| c                   | Fator de escala                          |
| $\text{CO}_2$       | Gás carbônico                            |
| $C_P$               | Coeficiente de potência                  |
| D                   | Diâmetro do rotor da turbina             |
| $f_i$               | Frequência de ocorrência                 |
| hab/km <sup>2</sup> | Habitantes por quilômetro quadrado       |
| $H_m$               | Altitude do local                        |
| k                   | Fator de forma                           |
| km                  | Quilômetro                               |
| km <sup>2</sup>     | Quilômetro quadrado                      |
| kW                  | Quilowatt                                |
| kWh/mês             | Quilowatt hora por mês                   |
| mm                  | Milímetro                                |
| mm/mês              | Milímetro por mês                        |
| MW                  | Megawatt                                 |
| MWh                 | Megawatt hora                            |
| MWh/mês             | Megawatt hora por mês                    |
| n                   | Número de aerogeradores no parque eólico |
| $P_T / P_i$         | Potência do rotor ou turbina             |
| $P_v$               | Potência do vento                        |
| T                   | Temperatura                              |
| U                   | Velocidade do vento                      |
| $\Delta t$          | Variação do tempo                        |
| $\rho$              | Densidade do ar                          |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 15 |
| 1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....  | 17 |
| 1.2. OBJETIVOS .....  | 18 |
| 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....   | 18 |
| 2. ENERGIA EÓLICA .....   | 19 |
| 2.1. TIPOS DE TURBINAS .....  | 21 |
| 2.1.1. TURBINAS COM EIXO HORIZONTAL.....                                    | 22 |
| 2.1.2. TURBINAS COM EIXO VERTICAL .....                                     | 23 |
| 3. MICROGERAÇÃO.....  | 29 |
| 3.1. O CENÁRIO DA MICROGERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL .....                       | 30 |
| 3.2. CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA .....                                      | 32 |
| 4. CARACTERÍSTICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE .....                   | 36 |
| 4.1. DEMOGRAFIA, SITUAÇÃO GEOGRÁFICA, CLIMATOLOGIA E PERFIL ECONOMICO ..... | 36 |
| 4.2. SITUAÇÃO ELÉTRICA E POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO .....                   | 39 |
| 4.3. CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DO ENCANTO .....                             | 44 |
| 4.3.1. CARACTERÍSTICAS DO CONSUMO ELÉTRICO DO ENCANTO .....                 | 47 |
| 5. DESENVOLVIMENTO .....  | 50 |
| 5.1. DADOS DA CIDADE.....   | 50 |
| 5.2. DADOS EÓLICOS.....   | 50 |
| 5.3. CARACTERÍSTICAS DO AEROGERADOR.....                                    | 53 |
| 5.4. CURVA DE DENSIDADE DE POTÊNCIA.....                                    | 57 |
| 5.5. PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA.....   | 58 |
| 5.6. FATOR DE CAPACIDADE.....   | 60 |
| 5.7. QUANTIDADE DE AEROGERADORES E ÁREA DO PARQUE .....                     | 60 |
| 5.8. ANÁLISE FINANCEIRA .....   | 61 |
| 5.8.1. CENÁRIO REALISTA.....  | 64 |
| 5.8.2. CENÁRIO OTIMISTA .....   | 66 |
| 5.8.3. CENÁRIO PESSIMISTA.....  | 68 |
| 5.9. PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS .....                                      | 70 |
| 6. CONCLUSÕES.....  | 73 |
| REFERÊNCIAS.....  | 75 |

## 1. INTRODUÇÃO

Para um país que planeja um crescimento, quer seja na área industrial, econômica ou qualquer outra, o setor energético tem que estar alinhado a esses planos. Atualmente, o Brasil se encontra em uma recessão econômica, com inúmeras fábricas e indústrias fechando. Tal fato nos apresenta uma pequena margem para a ampliação no setor elétrico, condizente com nossas futuras expectativas de expansão, pois mesmo com essa crise, sua demanda continua crescendo. Isso não significa que o acesso à energia elétrica está aumentando, pois muitas famílias ainda não a possuem.

De acordo com o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cerca de 1,3 milhão de residências brasileiras encontram-se desconectas do Sistema Interligado Nacional (SIN), onde 57% desse montante não possui acesso à energia elétrica e o restante a obtém através de fontes independentes.

Com o intuito de reduzir os percentuais obtidos no Censo de 2000, que apresentava mais de 2 milhões de residências sem energia elétrica, em 2003, foi lançado o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - "LUZ PARA TODOS", por meio do decreto nº 4.873/2003. Esse programa inicialmente teria prazo até o ano de 2008, porém foi prorrogado algumas vezes, onde o vigente foi instaurado pelo decreto nº 8.387/2014 que prevê continuidade até 2018. As áreas rurais do Norte e Nordeste são as regiões mais beneficiadas, registrando 71% das instalações até meados de 2015. (PORTAL PLANALTO, 2015)

As duas regiões possuem homogeneidade espacial e sazonal da temperatura. Entretanto o Norte possui uma precipitação muito superior que a do restante do país, tendo seus meses mais secos no inverno, em contrapartida o Nordeste é o local mais seco e com o maior potencial eólico durante a maior parte do ano.

Pensando na parte energética dessas localidades, através do portal da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é possível verificar que aproximadamente 80% das instalações e geração eólicas do país estão concentradas no território nordestino e 6% das instalações, que totaliza 24% do potencial hídrico nacional é obtida no Norte.

Esse crescimento na utilização de fonte eólica se deu devido à crise energética de 2001, onde tentou-se incentivar através do Programa Emergencial de energia Eólica (PROEÓLICA), ao qual não obteve resultados. Em 2002, entrou em vigor o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), pela Lei nº 10.438, com o objetivo de diversificar a matriz energética, promover segurança no abastecimento e valorizar as características e potenciais regionais e locais.

A crise hídrica que começou em 2011, também ajudou na busca por novas fontes, não somente na geração do SIN, onde grandes consumidores se viram obrigados a começarem uma busca por fontes alternativas, com a intenção de diminuir o valor pago pela energia, que nos últimos anos apresentou uma elevação de 100% nos valores de tarifas cobradas pelas concessionárias. Os consumidores residenciais também buscam aderir de alguma forma – geralmente utilizando energia solar para aquecimento de água, mas até o momento, o investimento individual para produção ainda é muito elevado, algo que se faz inviável para esse público.

Em 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa REN nº 482, que estabelece as condições gerais para microgeração, minigeração e compensação de energia elétrica em relação às distribuidoras. Porém em 2015 foi realizada uma audiência pública com o intuito de aprimorar e adequar aos consumidores, que resultou na REN nº 687/2015 e está válida desde março de 2016, com as seguintes definições:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada;
- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada;
- Sistema de compensação de energia elétrica: onde a energia ativa gerada por uma micro ou minigeração é injetada na rede da concessionária, como empréstimo gratuito e posteriormente compensada no consumo dessa mesma unidade consumidora ou de outra que possua o mesmo CPF e CNPJ.



Todo esse sistema de micro e minigeração de energia possui uma característica especial, pois além de ser uma forma de se produzir energia em localidades onde ainda não há o fornecimento público, mostra-se também interessante em localidades que são devidamente assistidas pelas concessionárias, devido ao fato de adquirir uma certa independência do consumidor em relação ao provedor do serviço, não ficando assim completamente dependente das tarifas e prestação de serviços oferecidas, que em muitas localidades não conseguem ofertar a disponibilidade e/ou serviços compatíveis com a demanda inseridas em sua rede de beneficiados.

### 1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o aumento do consumo elétrico e os acordos internacionais, discutidos na 21ª Conferência das Partes (COP) e entre Brasil e Estados Unidos (EUA), que determinou a substituição de fontes energéticas como as termoelétricas, por fontes de energias renováveis, como a solar, eólica, biocombustíveis, entre outras, a diminuição da queima de combustíveis fósseis, que emitem CO<sub>2</sub> (gás carbônico) - um dos maiores causadores do efeito estufa, a diminuição do desmatamento e mudança processos agrícolas e industriais, ao qual deverão ser cumpridos até 2030, o Brasil vêm aumentando a sua geração de energia elétrica, principalmente através de fontes renováveis.

Neste cenário, a energia dos ventos está se destacando e quando pensamos nesse tipo de geração presumimos que o Nordeste é onde está o maior potencial. Porém, não é no Nordeste que se encontra o grande centro de carga do país e sim no Sudeste, em especial na cidade de São Paulo. Dessa forma, quando a demanda de energia se iguala ou ultrapassa a geração, o sistema entra em colapso, tendo que ser desligado uma parte dos consumidores, geralmente Norte e Nordeste, para que o sistema continue a funcionar. Ambas as regiões são as de menor crescimento de PIB, ou seja, com maior nível de pobreza em relação ao restante do país e se pensarmos em um crescimento com uma energia sem estabilidade, não conseguiremos fazê-las prósperas.

Com base nessas informações, é de extrema importância estudos que busquem uma estabilidade energética para essas áreas, tanto para as áreas

comerciais / industriais quando para um consumidor de pequeno porte, nesse caso residências, de fontes alternativas de energia e que, consequentemente, possa resultar em um melhor atendimento energético, através da microgeração e a utilização das fontes mais abundantes existentes.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade da utilização de uma microgeração de energia para suprir a demanda energética residencial, através do potencial eólico, na Mesorregião do Oeste Potiguar, onde estão localizadas cidades com pouquíssimos comércios.

## 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta um breve relato sobre a história da energia eólica, assim como os tipos de turbinas e seus componentes.

O capítulo 3 explana sobre a microgeração e quais são as suas principais características e norma. Também aborda os procedimentos de rede referentes ao acesso à rede de distribuição e a qualidade de rede.

No capítulo 4 estão detalhadas as características geográfica, climatologia, elétrica e eólica, tanto do Estado do Rio Grande do Norte, quanto da cidade do Encanto.

No capítulo 5, será demonstrado o desenvolvimento de uma microgeração de energia eólica para suprir a demanda residencial da cidade do Encanto, assim como sua análise financeira. Também é informado uma proposta para o desenvolvimento de um estudo que possa ser mais viável.

## 2. ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica, nos casos dos moinhos e cata-ventos, ou em elétrica, através de turbinas e aerogeradores, ou seja, é aquela proveniente dos ventos.

Diferentes do que pensa-se a energia eólica já é utilizada a muito tempo, o primeiro registro histórico se data por volta de 200 A.C. na região da Pérsia. Acredita-se que antes disso, a China (2000 A.C.) e o Império Babilônico também utilizavam cata-ventos rústicos. (CRESESB, 2015).

O primeiro sistema eólico surgiu pelo crescimento da agricultura, onde estava sendo exigido um grande esforço braçal e animal. Devido a este problema o homem teve que desenvolver um sistema para otimizar o tempo e o processo, dessa forma, foi implementado um sistema onde um eixo horizontal ou vertical era conectado a uma gaiola circular e era movida através da tração animal ou física. Com o passar do tempo percebeu-se que poderiam utilizar os cursos d'água dos rios como força motriz, mas também havia um impedimento, não eram em todos os lugares que havia a possibilidade da utilização de rios e foi onde tiveram a percepção de usar o vento, assim surgindo o moinho de vento. (CRESESB, 2015).

Na Europa, os cata-ventos foram introduzidos com o retorno das Cruzadas, há 900 anos, onde foram largamente utilizados e seu desenvolvimento bem documentado. As máquinas primitivas persistiram até o século XII, quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países, tendo nos moinhos do tipo holandês a grande disseminação por vários países da Europa. Na Idade Média, as leis feudais da Europa, incluíam o direito a recusar a permissão à construção de moinhos de vento pelos camponeses, o que os obrigava a usar os moinhos dos senhores feudais para a moagem dos seus grãos. Dentro das leis de concessão de moinhos também se estabeleceram leis que proibiam a plantação de árvores próximas ao moinho assegurando, assim, o “direito ao vento”. (CRESESB, 2015).

Com o advento da máquina a vapor, durante a Revolução Industrial, o número de moinhos de vento começou a diminuir. Mesmo assim, na Holanda, ainda houve uma alta concentração de moinhos tradicionais. Nos séculos XVII e XVIII, os holandeses começaram a migrar para as colônias americanas, levando com eles a tecnologia dos moinhos. (PINTO, 2013).

No século XIX nos Estados Unidos presenciou-se uma proliferação dos moinhos de ventos. O primeiro moinho comercial americano foi desenvolvido e patenteado pelo mecânico estadunidense Daniel *Halladay*, em 1854, que possibilitou o abastecimento de água para as locomotivas a vapor da época, favorecendo a permanência dos colonos em regiões desérticas. (PINTO, 2013).

O primeiro moinho de vento para geração de eletricidade foi construído em julho de 1887, na cidade escocesa de Glasgow pelo engenheiro eletricitista e professor James *Blyth* (1839-1906) e em 1931 ele conseguiu a patente britânica da turbina. Até o século XIX, todos os moinhos produziam somente energia mecânica. Com o advento da eletricidade, os engenheiros perceberam que os moinhos podiam ser utilizados como geradores elétricos e sua potência ser utilizada para iluminação e aquecimento. (PINTO, 2013).

O meteorologista e físico dinamarquês *Poul la Cour*, marca o ponto de transição entre os moinhos de vento e a moderna tecnologia de geração eólica. *La Cour*, em 1891, construiu uma turbina eólica experimental que acionava um dínamo. Ele usou a corrente contínua gerada pela turbina para eletrólise e armazenou o hidrogênio então produzidos. De 1885 à 1902, lâmpadas de gás usando esse método iluminaram terrenos de escolas em Askov. Nos anos seguintes, *la Cour* montou uma oficina de testes para turbinas eólicas. (PINTO, 2013).

Entre 1891 e 1918, na Dinamarca, foram construídas mais de 100 turbinas na faixa de 20-35 kW. Em 1903, *la Cour* fundou a Associação Dinamarquesa dos Engenheiros de Energia Eólica (DVES). Em 1957, *Johannes Juul*, aluno de *la Cour*, construiu uma turbina de 200 kW, que forneceu corrente alternada para a companhia elétrica dinamarquesa SEAS. (PINTO, 2013).

Uma das principais razões para o sucesso do uso da energia eólica na geração de eletricidade foi o fato de que muitas das áreas rurais da Dinamarca eram alimentadas com corrente contínua, mesmo após a Segunda Guerra. Após a Primeira Guerra Mundial, houve uma queda no uso de eletricidade gerada pelos ventos, mas com a eclosão da Segunda Guerra Mundial as coisas mudaram, os combustíveis tiveram um grande aumento, fazendo com que o interesse nas turbinas eólicas viessem à tona novamente. (PINTO, 2013).

A Alemanha começou a utilizar moinhos para bombeamento de água antes da Primeira Guerra Mundial. Em 1925, o físico alemão *Albert Betz* (1885-1968)

publicou o livro *A energia eólica e sua exploração pelos moinhos de ventos*, onde mostra o resultado de sua pesquisa e a formulação da base teórica para o formato aerodinâmico das pás do rotor eólico que é válida até hoje. (PINTO, 2013).

O engenheiro *Herrman Honnef* (1878-1961), foi um dos primeiros a trabalhar com as novas descobertas de *Betz*, e desenvolveu o conceito de enormes usinas eólicas, que deveriam ser combinadas com as usinas elétricas tradicionais visando um preço mais econômico. (PINTO, 2013).

Com o fim da Segunda Guerra, o preço dos combustíveis voltaram a cair, onde, novamente, o uso da energia vinda dos ventos teve uma descontinuidade, voltando a ficar em foco na crise do petróleo em meados dos anos de 1970. Em 1973, a OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo - aumentou o preço do petróleo, dessa forma diminuiu a oferta. Com isso os Estados Unidos teve que investir em pesquisas e fabricação no campo eólico. (PINTO, 2013).

Após a crise o único país que tinha certa tradição na operação de turbinas menores era a Dinamarca. Até 1985, os operadores daquele país recebiam cerca de 30% do valor da compra das unidades como um subsídio direto do governo. Além de utilizarem a energia eólica em grande escala, os dinamarqueses também foram pioneiros na geração de energia eólica sob as águas, onde a primeira construção offshore foi construída em 1991, localizada a 1,6 km da costa dinamarquesa. (PINTO, 2013).

## 2.1. TIPOS DE TURBINAS

As turbinas podem ser classificadas de diversas formas, de acordo com:

- O **eixo de rotação**, podendo ser de eixo horizontal (*horizontal axis wind turbine – HAWT*), onde o eixo é paralelo a direção do vento ou de eixo vertical (*vertical axis wind turbine – VAWT*), que possuem o eixo perpendicular à direção do vento. (VELASCO, 2009)
- A **força que origina a rotação**, dividindo-se em turbina de sustentação e de arranque. A turbina de sustentação tem sua força na direção ortogonal ao vento, podendo ter secções das pás que atinjam velocidades maiores que a do vento, enquanto a de arranque trabalha com a força na direção do vento, não

permitindo que nenhum componente possua velocidade maiores que a do vento. (VELASCO, 2009)

- A **solidez**, classificando-se com de Baixa ou Alta solidez, onde as turbinas de Alta solidez necessitam de uma força maior para sair da inércia e baixas rotações para a máxima eficiência de produção de energia, ou seja, alto torque e baixa velocidade. Em contrapartida, as de Baixa solidez utilizam uma força menor e rotações mais elevadas para obter a mesma geração. (VELASCO, 2009)
- O **uso**, moinho eólico, que converte a energia eólica em energia mecânica ou aerogerador, que produz energia elétrica através dos ventos. (VELASCO, 2009)

#### 2.1.1. Turbinas com eixo horizontal

Os conversores de energia eólica que possuem seu eixo de rotação na posição horizontal são compreendidos sob as bases do conceito das hélices, onde estão presentes nos moinhos de ventos europeus e nas turbinas eólicas atuais. Possuem as seguintes características: (PINTO, 2013)

- Através do controle do ângulo das pás é possível controlar a velocidade do rotor e a saída de potência, sendo também, proteção para o excesso de velocidade;
- O formato das pás do rotor pode ser otimizado aerodinamicamente e alcança sua eficiência máxima quando a sustentação aerodinâmica é levada ao máximo;
- Líder no desenvolvimento em projetos de hélices. (PINTO, 2013).

Essa tecnologia têm as seguintes vantagens e desvantagens:

##### Vantagens:

- Acesso a ventos com maiores velocidades, devido à altura da torre;
- Melhor controle devido ao ajuste do ângulo de passo;
- Alta eficiência. (PINTO, 2013)

### Desvantagens:

- Dificuldade de instalação em torres altas;
- Dificuldade no transporte dos equipamentos;
- Necessidade de um sistema de controle para girar as pás na direção dos ventos;
- Construção complexa da torre para sustentação das pás e do cubo. (PINTO, 2013).

As turbinas de eixo horizontal podem ser de dois tipos:

Downwind: O vento incide na parte traseira da área de varredura da turbina. Sua vantagem é que o controle de ajuste é feito pelo próprio vento, mas tem como problema o efeito de sombra do vento, que ocorre quando a pá passa pela torre, fazendo com que, nesse curto espaço de tempo, o vento seja reduzido e a pá seja flexionada, causando ruído, desgaste da pá e uma redução no potencial de saída. (PINTO, 2013).

Upwind: O vento incide na parte dianteira da área de varredura da turbina. Oferece mais potência que a downwind, mas por outro lado, necessita de um complexo sistema de ajuste para manter as pás na direção dos ventos. A maioria das turbinas eólicas modernas é do tipo upwind. (PINTO, 2013).

### **2.1.2. Turbinas com eixo vertical**

As turbinas eólicas de eixo vertical, possuem o rotor e pás em posição vertical e rodam de forma perpendicular ao vento. No início, os rotores com eixo vertical só eram construídos como simples rotores de arrasto.

Um sistema de rotor de eixo vertical possui diferentes modelos:

- **Rotor de *Darrieus*:** O aerogerador de modelo *Darrieus*, patenteado por *Georges Darrieus* em 1927, diferente dos modelos convencionais de turbinas horizontais, atua como um múltiplo da velocidade dos ventos, graças ao seu conjunto de aerofólios em forma de asas de turbina. Atua na produção de energia a partir de ventos, não importando a direção em que esses soprem. Além disso, seu design permite que o gerador seja posto próximo ao chão, o

que garante facilidades de manutenções ou gerenciamento de funcionamento. Quando o vento entra em contato com essa estrutura, é criado um ângulo de ataque, que, já entre a faixa de 0 a 20 graus, garante um desempenho suficientemente ideal para a produção de energia, pois isso permite que a estrutura gire o eixo do rotor em uma velocidade ainda superior à do próprio vento que a movimenta. (PINTO, 2013; RAGHEB, 2014)

**Rotor H:** O rotor H é caracterizado por ser um dos mais simples tipos de geradores verticais. Possui duas pás ligadas a um eixo central, em forma de H, que permite captar energia em todas as direções de atuação do vento sobre a estrutura, dispensando o uso de mecanismos que auxiliem nas mudanças bruscas de direção do vento. Suas pás são anexadas diretamente no eixo rotatório, fato que dispensa a implantação de caixas controladoras de velocidade e outros tipos de engrenagens, podendo assim ser usado um sistema de lâminas simples, contribuindo ainda com o baixo custo de implantação quando comparado a outros modelos. (WAHL, 2007)

- **Rotor de Savonius:** Idealizado primordialmente em 1922, pelo engenheiro finlandês *Sigurd Johannes Savonius*, trata-se de uma turbina de eixo vertical que, em sua forma simplificada, usa um rotor composto por dois copos ocultos ou por duas metades de tambores, fixados, em direções opostas, em um eixo central rotatório. Tal estrutura funciona a partir da captura do vento, girando na direção desse, e, conseqüentemente, girando o eixo central. A partir do fluxo do vento, a disposição dos copos permite o deslocamento desses, repetindo o processo a cada novo ciclo do eixo, podendo, dessa forma, serem alocados geradores ou bombecedores que convertam o movimento do eixo, em energia elétrica ou mecânica. Dessa forma, o rotor *Savonius* dispensa sua disposição segundo a orientação do vento, como acontece em aerogeradores horizontais. (PORTAL ENERGIA, RAGHEB, 2014)
- **Modelo Híbrido (Savonius-Darrieus):** Trata-se de uma junção das duas tecnologias acopladas a um único eixo vertical, o que permite um melhor aproveitamento da energia gerada, levando em conta que ambas as estruturas recebem o mesmo volume de vento, e funcionam simultaneamente. (RAGHEB, 2014)



- **Modelo Helicoidal e Turbina *Turby*:** Considerando o fato de que os aerogeradores verticais dispensam uma parcela considerável de energia em vibrações, diminuindo ainda a eficiência da turbina, foi desenvolvido um modelo de turbina denominado Helicoidal, que possui um eixo rotatório diretamente ligado a lâminas em forma de espirais, o que facilita a passagem do vento, em qualquer que seja a direção dele. Tais lâminas ainda, por possuírem uma maior área de atrito com o vento, produz menos vibrações, se tornando mais eficiente em comparação a outros modelos. O exemplo mais clássico de turbina helicoidal é a turbina *Turby*, ideal a ser aplicada em centro urbanos principalmente por sua portabilidade. Possui três lâminas acopladas ao eixo, porém não diretamente, característica que permite uma passagem mais gradual que outros modelos, e uma aumento na angulação do ataque do vento, se comparado ao modelo *Darrieus*. (RAGHEB, 2014; TURBY, [2006?])

A tabela abaixo apresenta as principais diferenças entre as turbinas rotor H, *Darrieus* e de eixo horizontal:

Tabela 2.1: Diferenças entre três modelos de turbinas eólicas

|                                     | ROTOR H   | DARRIEUS   | TURBINA DE EIXO HORIZONTAL |
|-------------------------------------|-----------|------------|----------------------------|
| Perfil da pá                        | Simples   | Complicado | Complicado                 |
| Mecanismo de direção                | Não       | Não        | Sim                        |
| Possibilidade de mecanismo de passo | Sim       | Não        | Sim                        |
| Torre                               | Sim       | Não        | Sim                        |
| Cabos de sustentação                | Opcionais | Sim        | Não                        |
| Ruído                               | Baixo     | Moderado   | Alto                       |
| Área da pá                          | Moderada  | Grande     | Pequena                    |
| Carga na pá                         | Moderada  | Baixa      | Alta                       |
| Posição do gerador                  | No solo   | No solo    | No alto da torre           |
| Autoinicialização                   | Não       | Não        | Sim                        |
| Interferência da torre              | Pequena   | Pequena    | Grande                     |
| Fundação                            | Moderada  | Simples    | Extensa                    |
| Estrutura global                    | Simples   | Simples    | Complicada                 |

Fonte: PINTO, 2013

Essa tecnologia têm as seguintes vantagens e desvantagens:

### Vantagens:

- Não precisa de maquinário para ajustá-lo na direção do vento, capta vento em todas as direções;
- Todos os equipamentos pesados contido na nacela podem ser colocados no solo, facilitando a manutenção;
- Sistema com menos elementos de desgaste, por conter somente um eixo;
- São mais silenciosas.
- Não há pressão sobre a estrutura de apoio, como no caso do gerador de vento horizontal;
- Como um gerador eólico necessita de espaço limitado, este dispositivo pode ser instalado próximo um do outro em um parque eólico. (PORTAL METÁLICA, 2012)

### Desvantagens:

- Baixos valores para o TSR (relação entre a velocidade do vento e a velocidade das lâminas (pás) – dado por:  $TSR(\lambda) = \text{Velocidade da lâmina} / \text{Velocidade do vento}$ , devido as pás ficarem próximas ao solo, onde a velocidade do vento é reduzida;
- Dupla incapacidade de partida própria;
- Devido à turbulência causada pelos ventos “baixo”, a tensão submetida a turbina aumenta;
- As chances de esses geradores eólicos pararem de funcionar quando submetidos a fortes ventos não devem ser descartadas;
- Custo de fabricação mais elevada. (PORTAL METÁLICA, 2012; PINTO, 2013)

## 2.2. COMPONENTES DO AEROGERADOR

No geral, as turbinas de eixo vertical possuem os mesmos componentes que as horizontais, conforme demonstra a imagem abaixo:

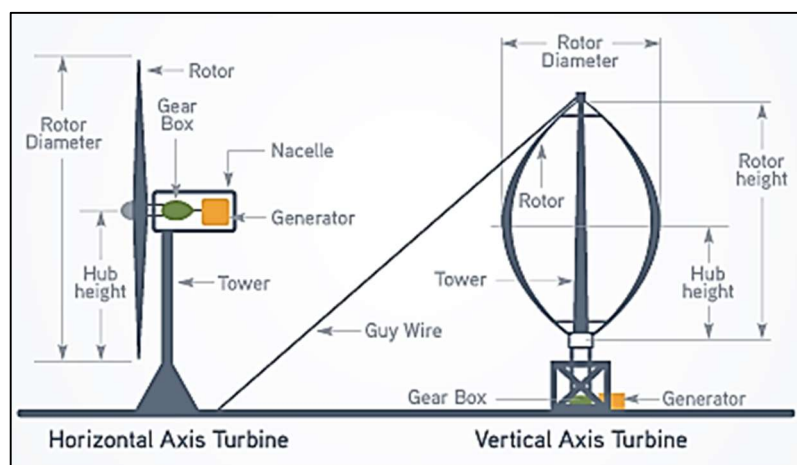


Figura 2.1: Componentes do aerogerador

Fonte: Hill Country Wind Power

**Rotor:** Funciona como o gerador de cargas cíclicas. Nele estão as pás rotatórias, o controle aerodinâmico de inclinação das pás e o cubo rotor, componentes estes responsáveis por transformar energia dos ventos em energia motora que estão diretamente interligados com o sistema de transmissão. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

**Sistema de Transmissão Elétrica:** Este sistema fica acoplado ao rotor, onde estão contidos o eixo principal, multiplicador, freios e o gerador elétrico, responsáveis por encaminhar a energia cinética produzida nas pás até a conversão da mesma em elétrica. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

**Sistema de Direcionamento:** Sistema responsável pelo direcionamento do aerogerador de acordo com as orientações dos ventos. Este sistema é classificado em dois tipos: Direcionamento ativo, que se utiliza de um motor para a adequação aos ventos e Direcionamento livre que o faz apenas com fatores aerodinâmicos. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

**Nacele:** É o alojamento de proteção dos componentes mecânicos e elétricos do aerogerador contra intempéries e agentes do tempo. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009) No caso dos aerogeradores de eixo vertical, os componentes não necessariamente terão essa caixa, pois eles ficarão na base da torre e poderão ficar separados, conforme demonstra a figura 2.1.

**Torre:** São responsáveis pela sustentação da turbina na altura especificada, normalmente sempre acima 24m. Existem 3 tipos de classificação de torres: treliça,

torre tubular e estrutura de poste estaiado. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

### 3. MICROGERAÇÃO

Para definir o que é microgeração é importante compreender os conceitos de geração distribuída (GD), tema que está sendo bastante difundido na atualidade. A geração distribuída pode ser definida como uma forma descentralizada de geração, onde a sua produção está próxima da carga, evitando grandes perdas de energia. Essa geração pode vir através de fontes renováveis, como eólica, solar, pequenas centrais hidrelétricas ou até mesmo das não renováveis, como o carvão, podendo ser utilizado com sistemas de cogeração ou trigeração, que é a produção simultânea e sequencial de energia, por meio de um único insumo energético, por exemplo: a obtenção de energia térmica e mecânica ou elétrica a partir da queima de um único combustível.

No Brasil, a definição e a diferença entre mini e microgeração é dada através do art. 1º da Resolução Normativa nº 687/2015, onde altera o art. 2º da Ren nº 482/2012:

**I - microgeração distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

**II - minigeração distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Observa-se que tanto a mini quanto a microgeração, se não for através de cogeração qualificada, só pode ser utilizada fontes de energia renováveis, ao qual esse sistema deverá ser conectado à rede de distribuição por meio de unidades consumidoras.

Abaixo, algumas características que a resolução trás, visando no incentivo da adesão de uma matriz mais sustentável, mantendo um balanceamento entre todos os envolvidos. Lembrando que essas regras, podem ser mudadas através de novas audiências públicas e resoluções normativas.

- **Medição:** Os sistemas de medição deverão atender as especificações das outras unidades, porém com um diferencial, deverá ser medida também a produção, sendo esta uma responsabilidade da distribuidora nas instalações

de micro e minigeração com o diferencial que a minigeração deverá ressarcir a distribuidora pela adequação. (ANEEL, 2016)

- **Compensação de energia:** Toda energia produzida em excedente que for injetada no sistema voltará ao produtor em forma de créditos para serem usados em outro imóvel do mesmo CPF do produtor. Caso esteja na mesma área de atuação da distribuidora, os créditos serão válidos por 60 meses. Mesmo que o excedente seja maior que o consumido será cobrada a taxa de disponibilidade 30 kW para monofásico, 50 kW para Bifásico e 100 kW para trifásico, isso para instalações de baixa tensão. (ANEEL, 2016)
- **Custo Benefício:** Todos os custos de instalação e manutenção dos geradores compete ao instalador, definindo este quais são as melhores características para sua geração, isentando assim a distribuidora de qualquer ônus. (ANEEL, 2016)
- **Impostos:** A incidência de impostos foge a competência da ANEEL, cabendo assim à Receita Federal e as Secretarias da Fazenda Estaduais as incidências dos mesmos. (ANEEL, 2016)
- **ICMS:** Aos estados que aderiram ao convênio ICMS 16/2015, tal imposto será incidido somente sobre a diferença entre a energia produzida e a energia utilizada. Já aos que não aderiram a tal convênio continua valendo a regra atual de se taxar toda a energia utilizada, sem se considerar a energia injetada na rede. (ANEEL, 2016)
- **PIS/Confins:** Tratam-se de impostos federais, executados da mesma forma a todos os estados dispostos pela Lei 13169/2015, incidindo assim esses impostos somente sobre a diferença positiva entre a energia consumida e a energia injetada. (ANEEL, 2016)

### 3.1. O CENÁRIO DA MICROGERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL

Para estimular o uso de fontes renováveis através da geração distribuída o Ministério de Minas e Energia lançou em dezembro de 2015 o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica, conhecido como ProGD. A portaria nº 538/2015, cria o programa e define seus objetivos como:

I - promover a ampliação da geração distribuída de energia elétrica, com base em fontes renováveis e cogeração;

II - incentivar a implantação de geração distribuída em:

a) edificações públicas, tais como escolas, universidades e hospitais; e

b) edificações comerciais, industriais e residenciais

A intenção é que se tenha consiga criar e expandir linhas de créditos e formas de financiamento para a implantação da GD em residências, comércios e indústria, a fomentação da capacitação de profissionais na área de renováveis e a promover a atratividade para novos investimentos nacionais e internacionais, assim como a nacionalização de tecnologias competitivas. (MME, 2105)

Com todas as alterações nas resoluções, procedimentos e até mesmo a criação do programa, o número de novas conexões em 2016 é superior ao de 2015, segundo informações da ANEEL.

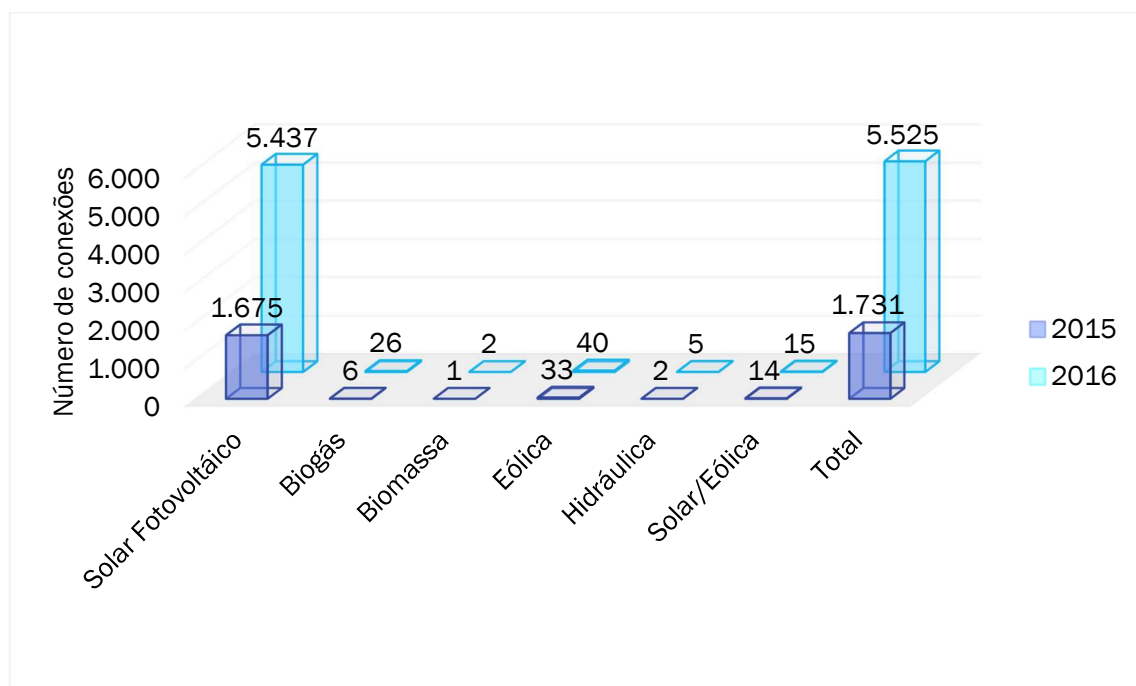


Gráfico 3.1: Número de conexões por fonte

Fonte: ANEEL, 2016

O número de novas conexões, na geração distribuição, em relação aos 2 anos mostrados no gráfico 3.1, foi de 319% até o momento, porém esse grande crescimento se dá a implementação de sistemas solares, que representa 98% do total. A contribuição da energia eólica é mínima e representa somente 0,7% do total, contribuindo pouquíssimo também em sistemas híbridos com solar.

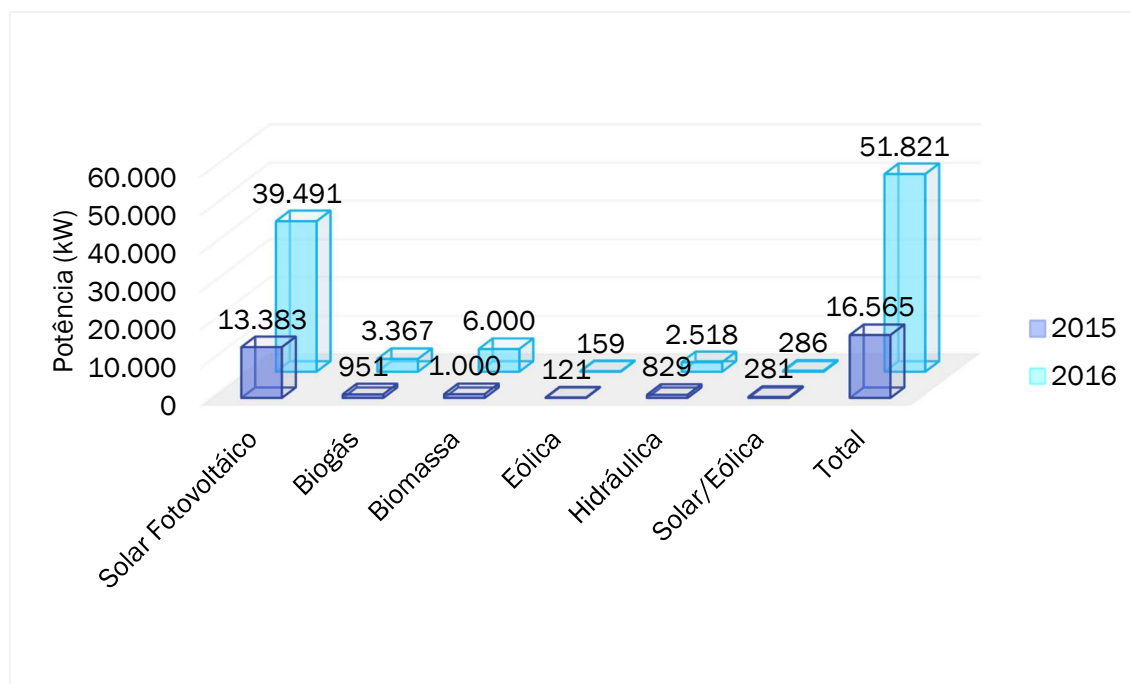


Gráfico 3.2: Potência Total Instalada (kW)

Fonte: ANEEL, 2016

Verificando a relação de potência instalada, o percentual da energia solar fica em 76% e a biomassa, mesmo que de forma modesta, tem uma contribuição maior, se for contrastado que são 2 centrais de biomassa gerando o equivalente a soma das demais, com exceção da fotovoltaica.

### 3.2. CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA

Para conexão com a rede de uma microgeração, deve-se ficar atento e seguir as regras dispostas na seção 3.7 do módulo 3 da PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Este módulo trata do acesso ao sistema de distribuição e a seção 3.7 está ligada ao acesso da micro e minigeração distribuída.

Quando se pensa na conexão, dever-se-a estar ciente em que nível de tensão estará trabalhando, para que as proteções sejam feitas de formas adequadas a cada nível. Como observa-se na tabela a seguir, a microgeração trabalha no nível de baixa tensão, assim como a minigeração, com uma exceção para fontes hídricas, que podem ter até 3 MW de potência instalada.



Tabela 3.1: Níveis de tensão considerados para conexão de centrais.

| Potência Instalada | Nível de Tensão de Conexão  |
|--------------------|-----------------------------|
| < 10 kW            | Baixa Tensão                |
| 10 a 75 kW         | Baixa Tensão                |
| 76 a 150 kW        | Baixa Tensão / Média Tensão |
| 151 a 500 kW       | Baixa Tensão / Média Tensão |
| 501 kW a 10 MW     | Média Tensão / Alta Tensão  |
| 11 A 30 MW         | Média Tensão / Alta Tensão  |
| > 30 MW            | Alta Tensão                 |

Fonte: Módulo 3 do PRODIST, 2016

Para se ter acesso a rede de distribuição através de microgeração ou minigeração distribuída, alguns critérios devem ser seguidos, tais como:

- O ponto de conexão do acessante é o ponto de entrega da unidade consumidora;
- As unidades consumidoras podem operar em modo de ilha, desde que desconectadas fisicamente da rede de distribuição.
- A quantidade de fases e o nível de tensão de conexão da central geradora serão definidos pela distribuidora em função das características técnicas da rede e em conformidade com a regulamentação vigente. (ANEEL, 2016)

No módulo 3 pode se obter todas as regras necessárias para a conexão, assim como as suas etapas, que são:

1. **Solicitação de acesso:** é o requerimento que, acompanhado de dados, estudos preliminares de acesso e informações sobre o empreendimento objeto do acesso, deve ser apresentado pelo acessante ao ONS ou à concessionária de transmissão ou à concessionária ou permissionária de distribuição, para que sejam definidas as condições de acesso visando à sua contratação; (ONS, 2016)
2. **Parece de acesso:** documento formal e obrigatório que é apresentado pela acessada, sem ônus para o acessante, que consolida e estabelece as condições de acesso, assim como o uso e os requisitos técnicos. (ANEEL, 2016). A responsabilidade de emissão é do ONS, para os acessos solicitados à Rede Básica, ou das concessionárias ou permissionárias de distribuição

quando o acesso for solicitado ao sistema de distribuição ou às DITs. (ONS, 2016)

3. **Implantação da conexão:** trata dos critérios para implementação (citados anteriormente), vistoria e recepção de instalações de conexão; (ANEEL, 2016)
4. **Aprovação do ponto de conexão:** está ligada à regularização de quaisquer pendências apontadas na vistoria e que impeçam a sua entrada em operação; (ANEEL, 2016)
5. **Contratos:** define os contratos que devem ser celebrados entre as partes e apresenta modelos de contratos, está definido na seção 3.6, no que for aplicável para o projeto e com as exceções apontadas no tópico 8 da seção 3.7. (ANEEL, 2016)

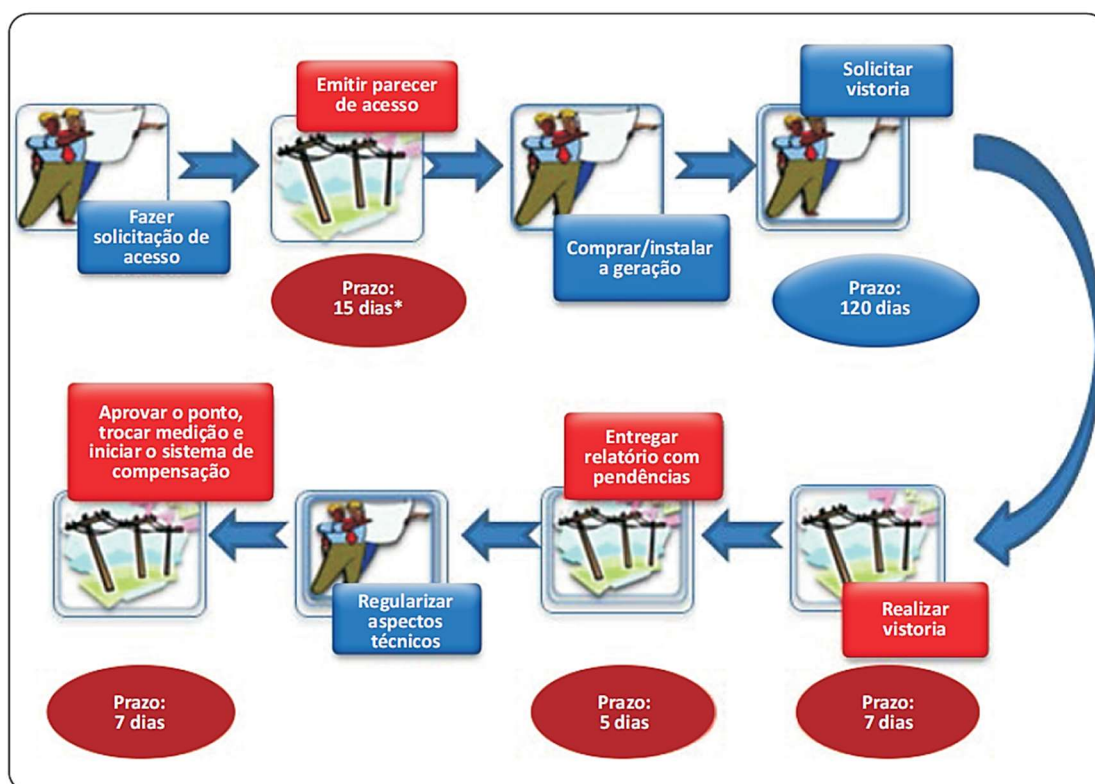


Figura 3.1: Procedimentos e etapas de acesso

Fonte: ANEEL, 2016

Um ponto importante é sempre observar a data de vigência do documento, como por exemplo, no atual momento é válido a revisão 6, que está vigente desde o dia 01 de março de 2016, de acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015, após a realização da Audiência Pública (AP) 26/2015. Entretanto, no site da ANEEL já

verifica-se que uma nova revisão será lançada de acordo com os dados da AP 37/2105 e deverá sua previsão de início é para 01 de junho de 2017. (ANEEL, 2016)

A Qualidade da Energia Elétrica deve ser sempre verificada e os seus parâmetros podem ser verificados também no PRODIST, porém no módulo 8, onde é abordado tanto a qualidade do produto quanto do serviço prestado, assim como seus valores de trabalho em condições normais, tempos de normalização do sistema decorrente as falhas citadas.

As definições usadas para definir a qualidade do produto e do serviço, segundo a ANEEL são:

→ Qualidade do produto, define a terminologia, caracteriza os fenômenos e estabelece os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão.

Os aspectos considerados para este caso são:

- a) *Tensão em regime permanente*: quando não há distúrbios capazes de invalidar a medição da tensão;
- b) *Fator de potência*: é uma metodologia de medição;
- c) *Harmônicos*: são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.
- d) *Desequilíbrio de tensão*: é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição;
- e) *Flutuação de tensão*: é a variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão;
- f) *Variações de tensão de curta duração*: são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo
- g) *Variação de frequência*: são desvios nos limites de frequência fora das condições normais de operação e em regime permanente. Limite de operação: 59,9 Hz e 60,1 Hz. (ANEEL, 2016)

→ Qualidade do serviço, estabelece os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento; (ANEEL, 2016)

## 4. CARACTERÍSTICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a demografia, o potencial eólico e as características dos parques instalados no estado do Rio Grande do Norte.

### 4.1. DEMOGRAFIA, SITUAÇÃO GEOGRÁFICA, CLIMATOLOGIA E PERFIL ECONOMICO

O Estado do Rio Grande do Norte possui 167 municípios, tendo Natal como sua capital. Sua área geográfica é de 52.811 km<sup>2</sup>, com uma densidade demográfica de 59,99 hab/km<sup>2</sup> e uma população estimada de 3.442.175 habitantes. (IBGE, 2010).

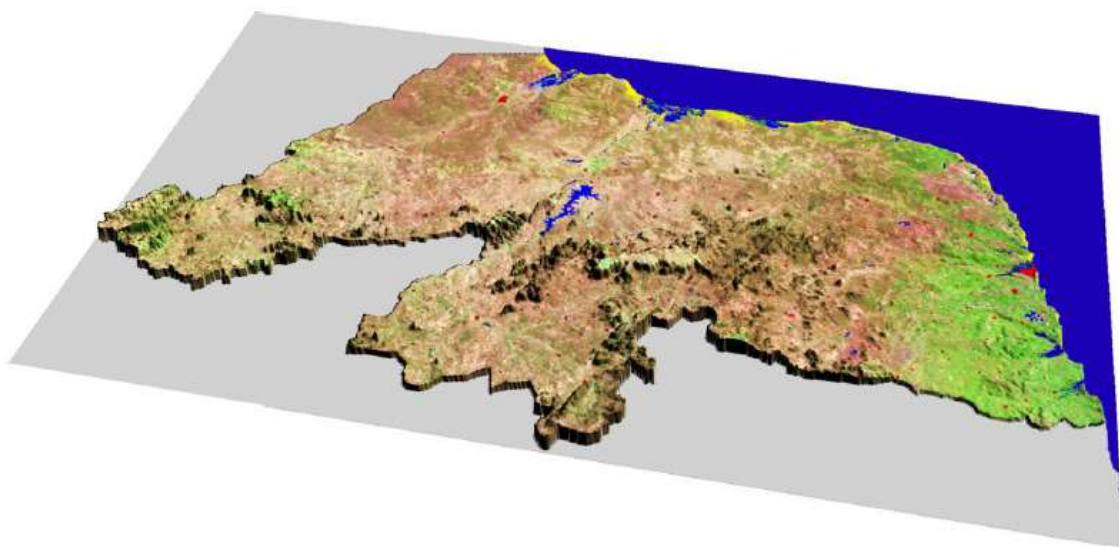


Figura 4.1: Características geográficas do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: ITAÚ, 2014

O estado possui um clima quente semiárido na maior parte do território e semiúmido no litoral. Abaixo apresenta-se a média anual de precipitação, que foi baseada em médias climatológicas de 60 anos. A figura 4.2 demonstra que existem áreas bem secas e outras onde as chuvas se acumulam, em sua grande maioria, na região litorânea. (COSERN, 2003)

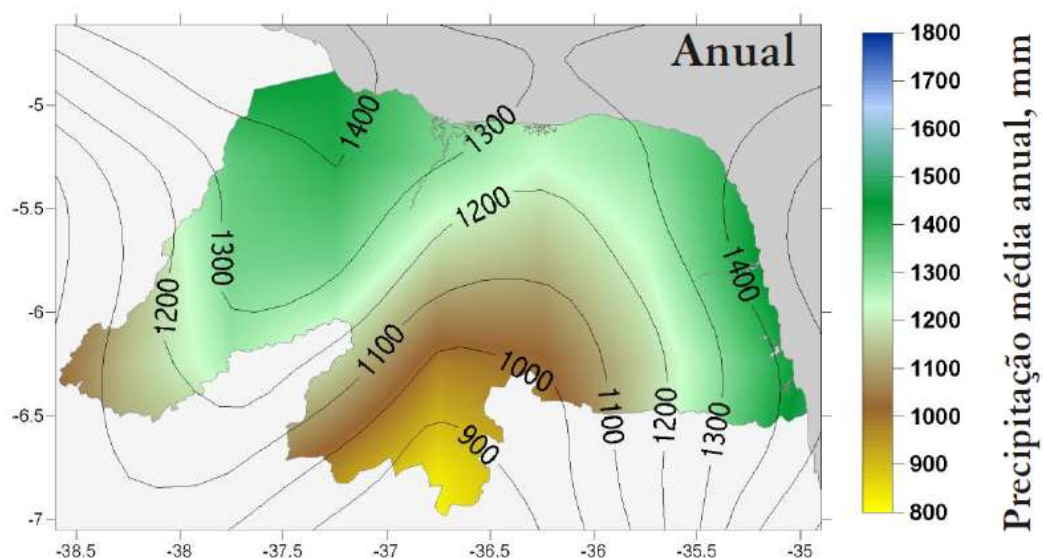


Figura 4.2: Precipitação média Anual do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

Na figura seguinte, apresenta-se a precipitação trimestral, subdividida por estação do ano, onde verifica-se que a primavera é muito seca e o outono com maior nível de precipitação.

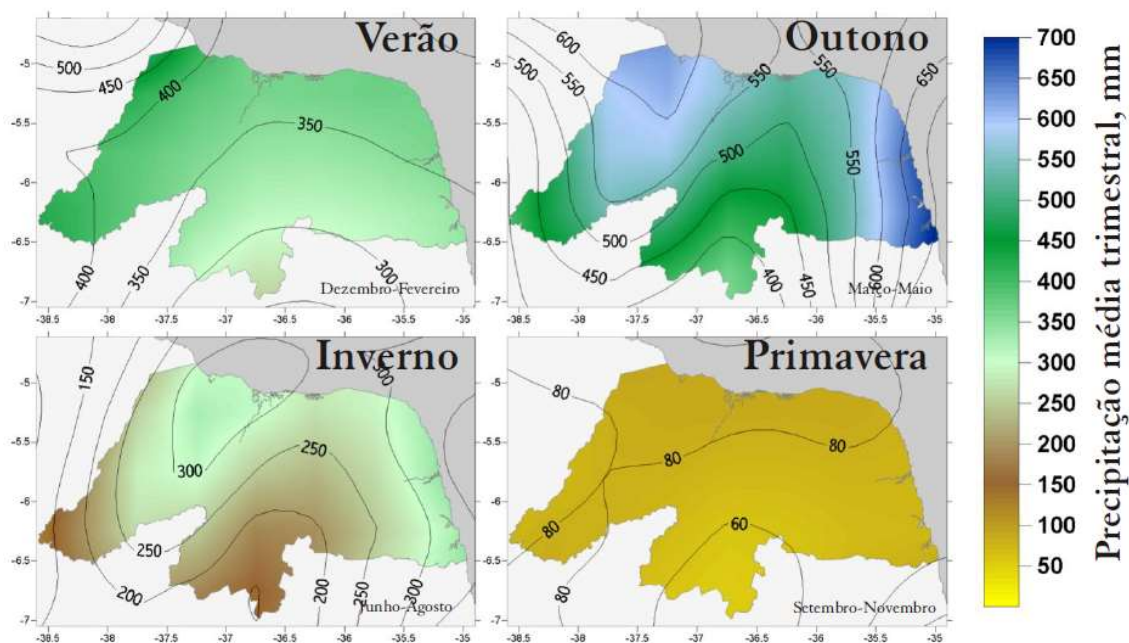


Figura 4.3: Precipitação média trimestral do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

No que se refere a temperatura, nota-se que a amplitude térmica do estado é quase nula em todo o território, com variações de 1 a 2,5°C.



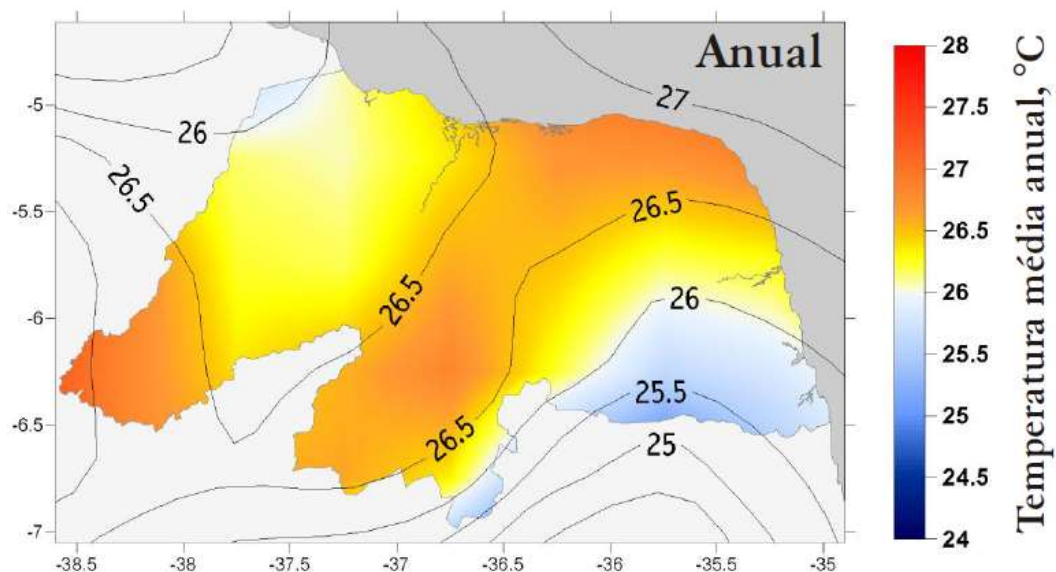


Figura 4.4: Temperatura média Anual do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

Durante as estações, essa diferença também é bem pequena, podendo chegar a 4 °C, em alguns pontos, se comparados o verão e o inverno:

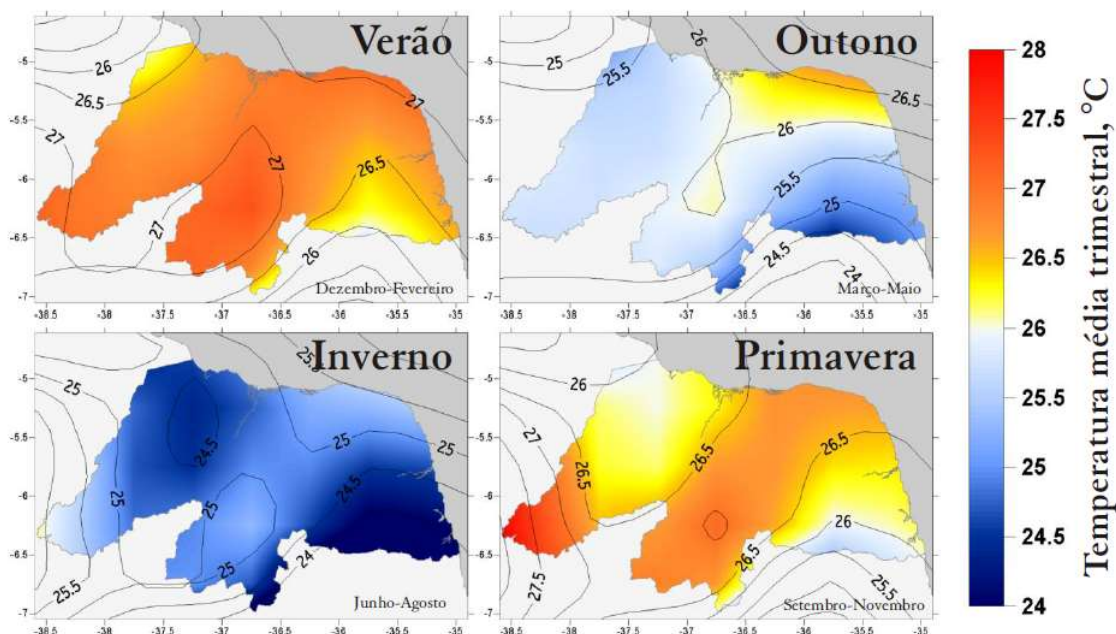


Figura 4.5: Temperatura média trimestral do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

Com temperaturas basicamente constantes, pouca precipitação, clima tropical e uma extensão de 400 km de praias, com dunas e um belo visual, é perceptível que o turismo tem significativa importância para a economia potiguar.

A economia do estado é baseada na área de serviços. Outro ramo de atividade, tendo um destaque importante, é na área da produção de sal marinho, sendo responsável por 95% da produção nacional. (ITAÚ, 2014)

O estado é dividido em 4 mesorregiões, cada qual com sua característica:

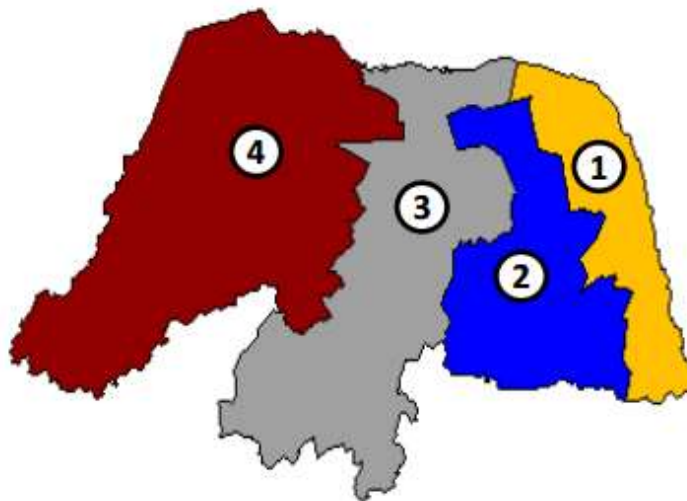


Figura 4.6: Mesorregiões do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: ITAÚ, 2014

1. Leste Potiguar: região mais rica e populosa. Na economia destaca-se o turismo, a indústria alimentícia e possui grande potencial eólico;
2. Agreste Potiguar: possui as áreas mais quentes e secas. O ecoturismo, a pecuária leiteira e a produção de mandioca e castanha-de-caju, são suas principais atividades econômicas;
3. Central Potiguar: é onde se encontra o polo da indústria saleira e também possui produção petrolífera;
4. Oeste Potiguar: possui projetos de irrigação e modernização na área da agropecuária, porém o seu destaque na economia é a produção petrolífera. (ITAÚ, 2014)

#### 4.2. SITUAÇÃO ELÉTRICA E POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO

Segundo o portal do Governo do Rio Grande do Norte, a COSERN, companhia responsável pela distribuição de energia no Estado, informa que 892.561 residências do estado possuem energia elétrica, porém em contra partida 6.952 não

possuem. (PORTAL DO GOVERNO DO RN, 2015). Essa informação está em sintonia com o Censo de 2010 do IBGE, onde informa que do total de residências que possuem energia, 0,5% a obtém a partir de outras fontes que não da distribuidora potiguar.

A COSERN possui bons indicadores de continuidade de serviço, mantendo-se sempre abaixo dos limites que medem a qualidade da distribuição, definidos para Duração e Frequência Equivalentes de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC e FEC, respectivamente). Em 2015, a média das centrais de distribuição indicou que o DEC foi de 14,72 horas de interrupções na distribuição e o FEC de 7,51 interrupções. Esses indicadores fazem parte de um pacote de normas e padronização da ANEEL, o qual visa manter a qualidade na distribuição de energia e está definido no Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica - do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). (ANEEL, 2016)

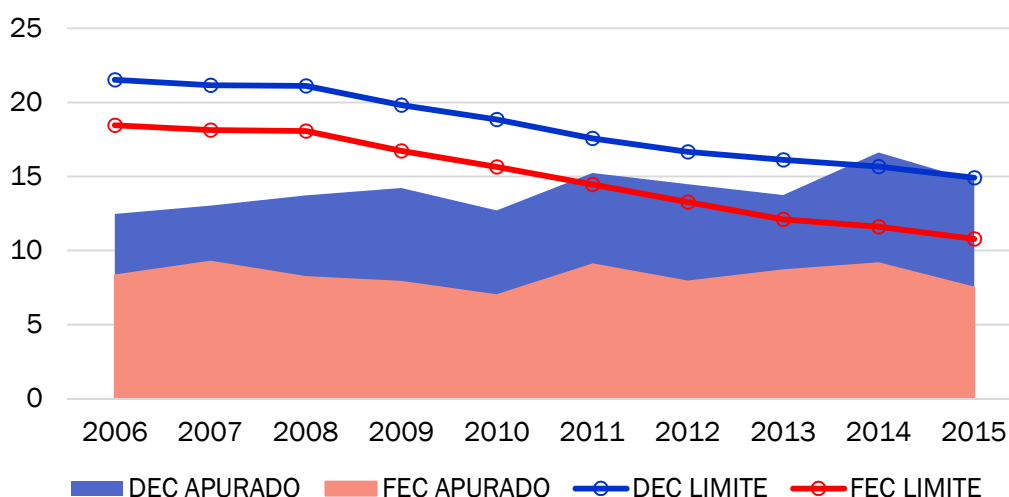


Gráfico 4.1: Índices de Continuidade da COSERN (Rio Grande do Norte)

Fonte: ANEEL

Os aspectos descritos estão ligados a fatores de distribuição, porém voltamo-nos para os fatores de geração, o estado deixa de ser um coadjuvante e passa a ser uma das potências nacionais, devido ao seu grande crescimento na produção de energia através de fontes de energia renováveis, nesse caso a eólica. A capacidade instalada hoje é de aproximadamente 3.477,1 MW, sendo 85% através da energia dos ventos e somente 0,03% solar. (ANEEL, 2016)



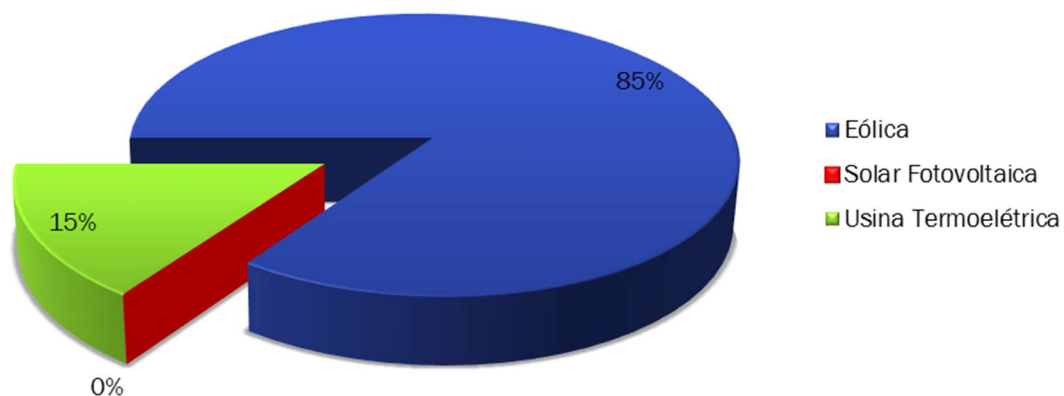


Gráfico 4.2: Capacidade Instalada do Rio Grande do Norte

Fonte: ANEEL

O Boletim Mensal de Geração por Estado, gerado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), informou que o estado do RN produziu 1.184,65 MW<sub>médio</sub> de energia no mês de junho deste ano, onde 15,6% através de térmicas e o restante sendo eólica.

Esse alto percentual de geração energia eólica se dá devido ao Estado estar em posição geográfica favorecida pelos ventos alísios, que são ventos de grande constância, como pode ser observado através do fator de Weibull. (COSERN, 2003)

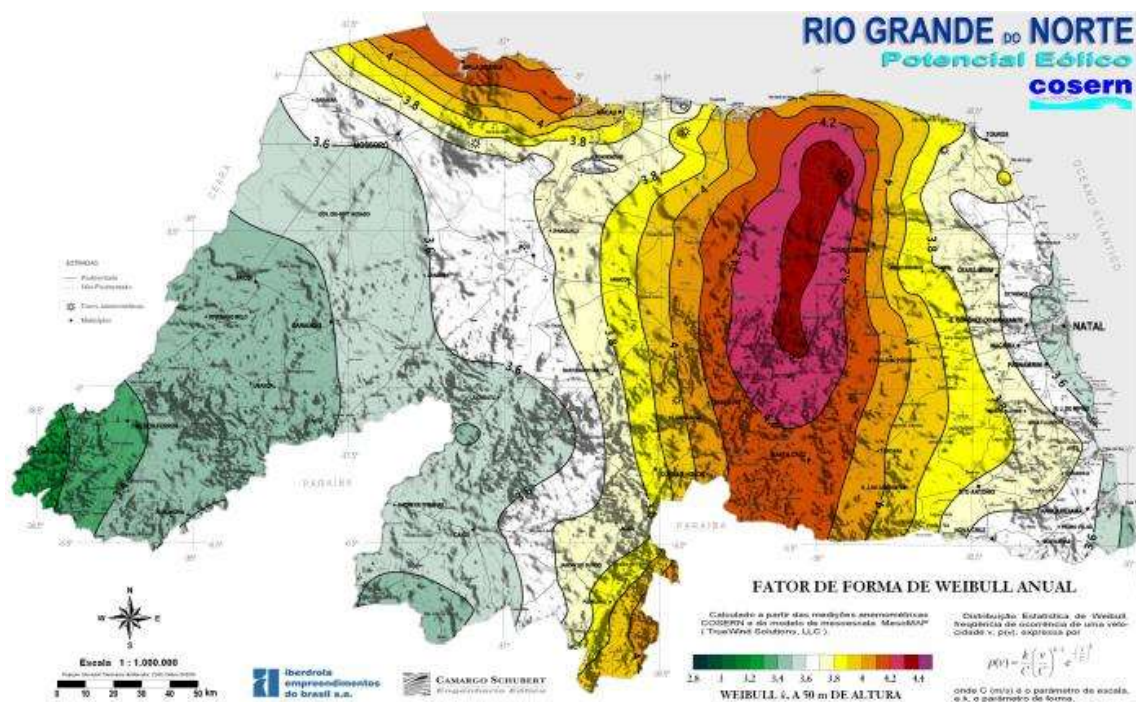


Figura 4.7: Fator de forma de Weibull Anual do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

Esses ventos tem acentuada ocorrência na direção leste e sudeste:  
(COSERN, 2003)

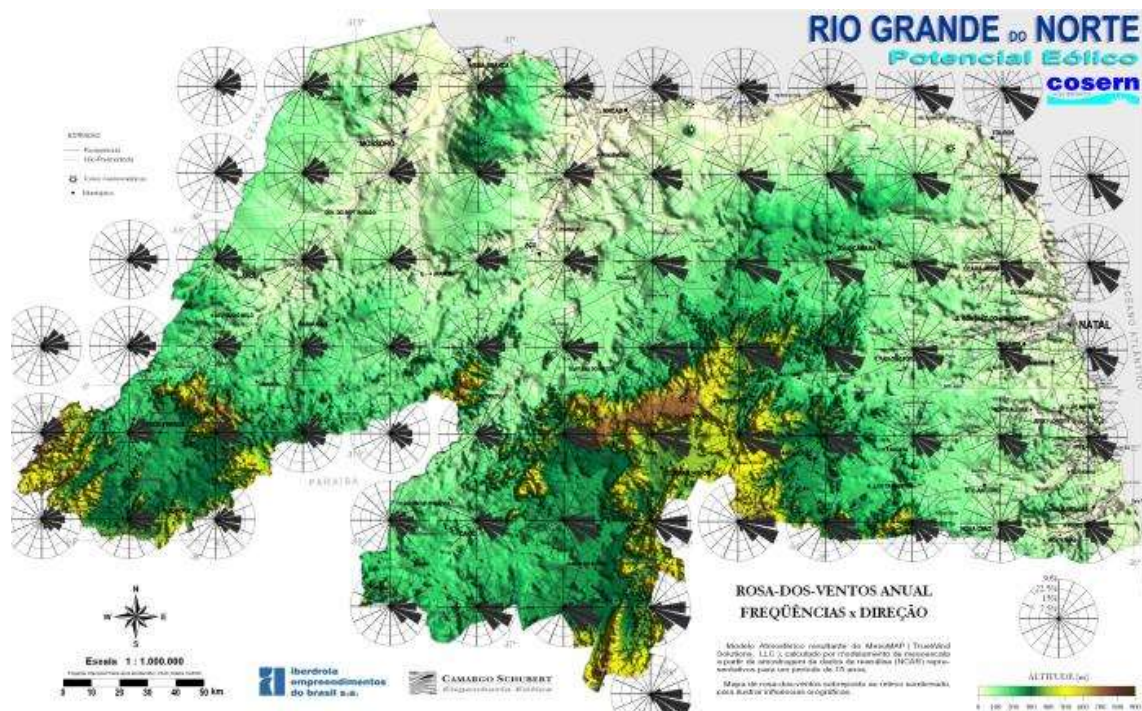


Figura 4.8: Rosa dos Ventos Anual do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

Além da frequência e da velocidade dos ventos outro fator que influe diretamente no potencial energético que a região pode absorver é a altura. Nas figuras a seguir, poderá ser observado a diferença de potencial em 50, 75 e 100 metros.



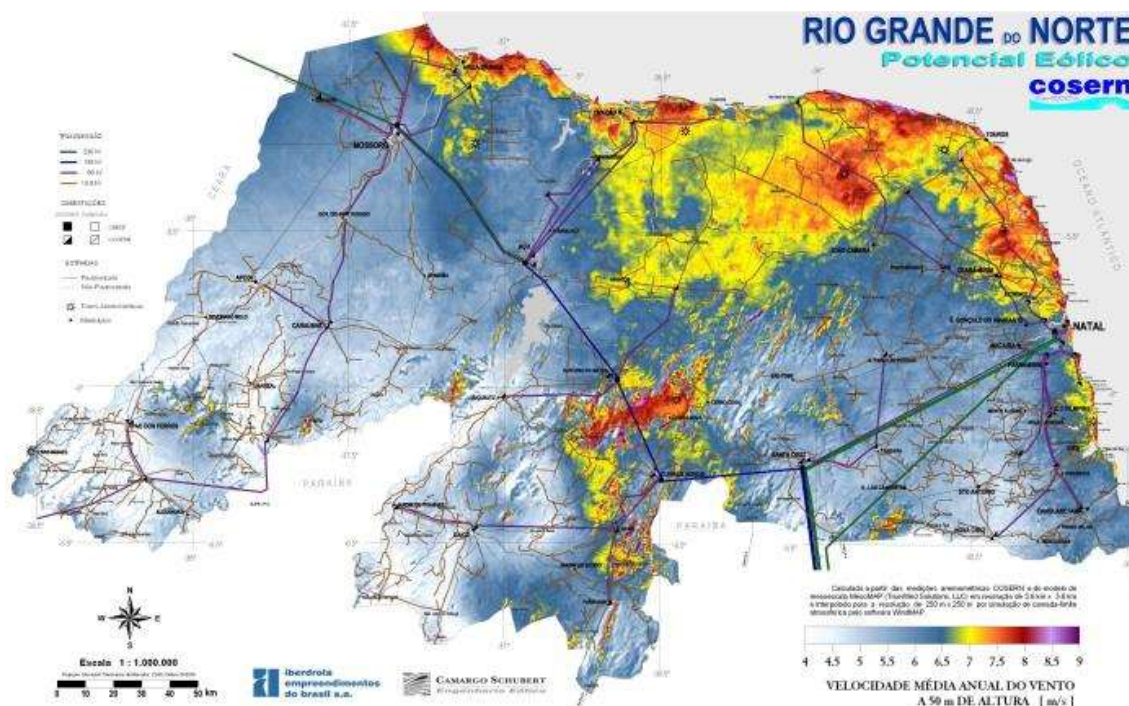


Figura 4.9: Potencial Eólico a 50 m de altura do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

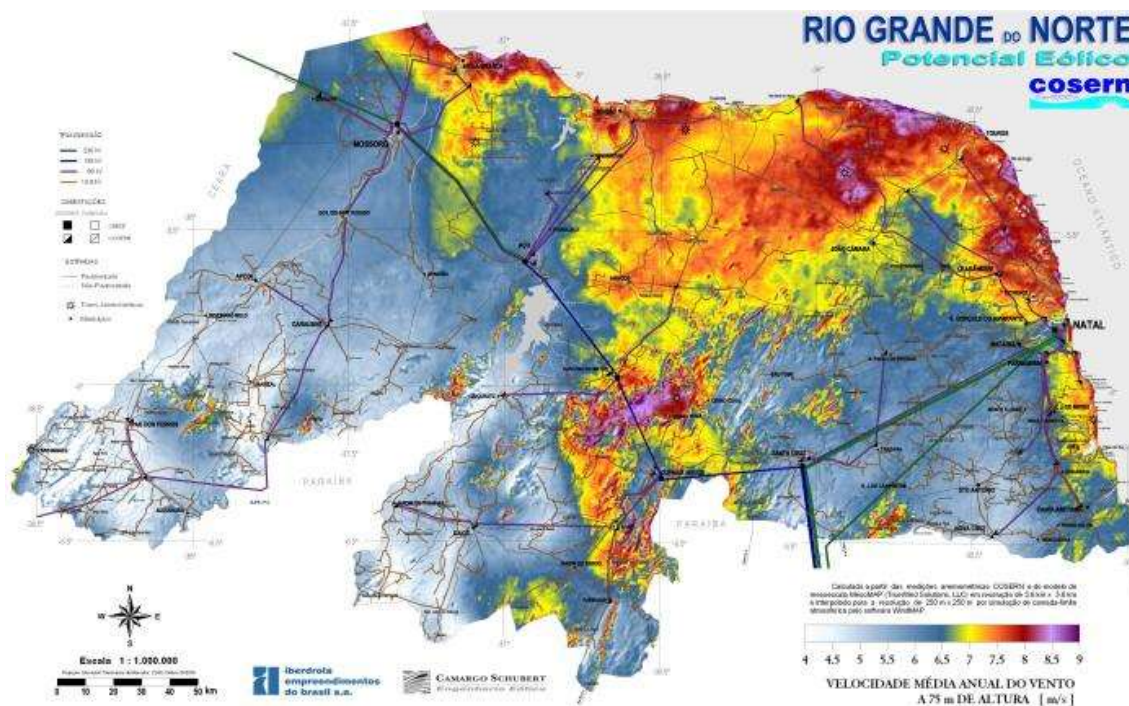


Figura 4.10: Potencial Eólico a 75 m de altura do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

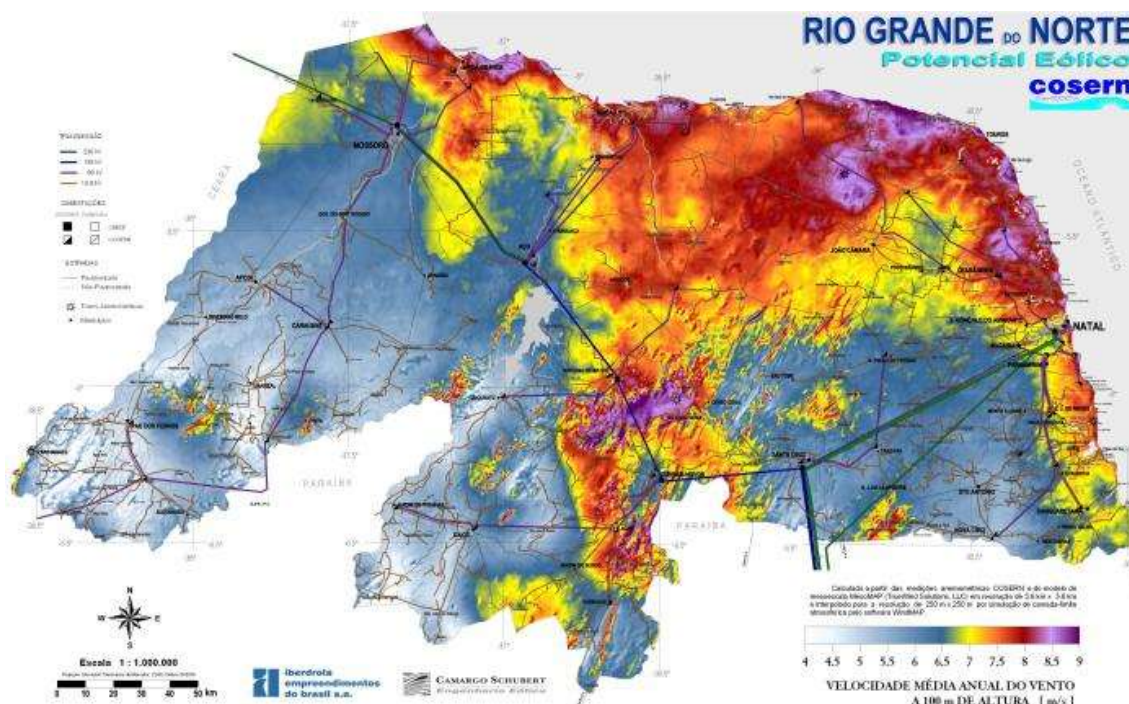


Figura 4.11: Potencial Eólico a 100 m de altura do Estado do Rio Grande do Norte

Fonte: COSERN, 2003

Como pode-se observar, o potencial aumenta conforme a altitude da medição aumenta e está bem concentrado no litoral. Outros fatores que devem ser analisados são o relevo, a rugosidade e a densidade da região.

#### 4.3. CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DO ENCANTO

A cidade do Encanto possui 5.231 habitantes distribuídos por um território de 125,7 km<sup>2</sup> (CENSO, 2010). Localizada da mesorregião do Oeste Potiguar, a cidade está localizada a 407 km da capital, Natal, e à aproximadamente 212 m de altitude (UOL, 2016).

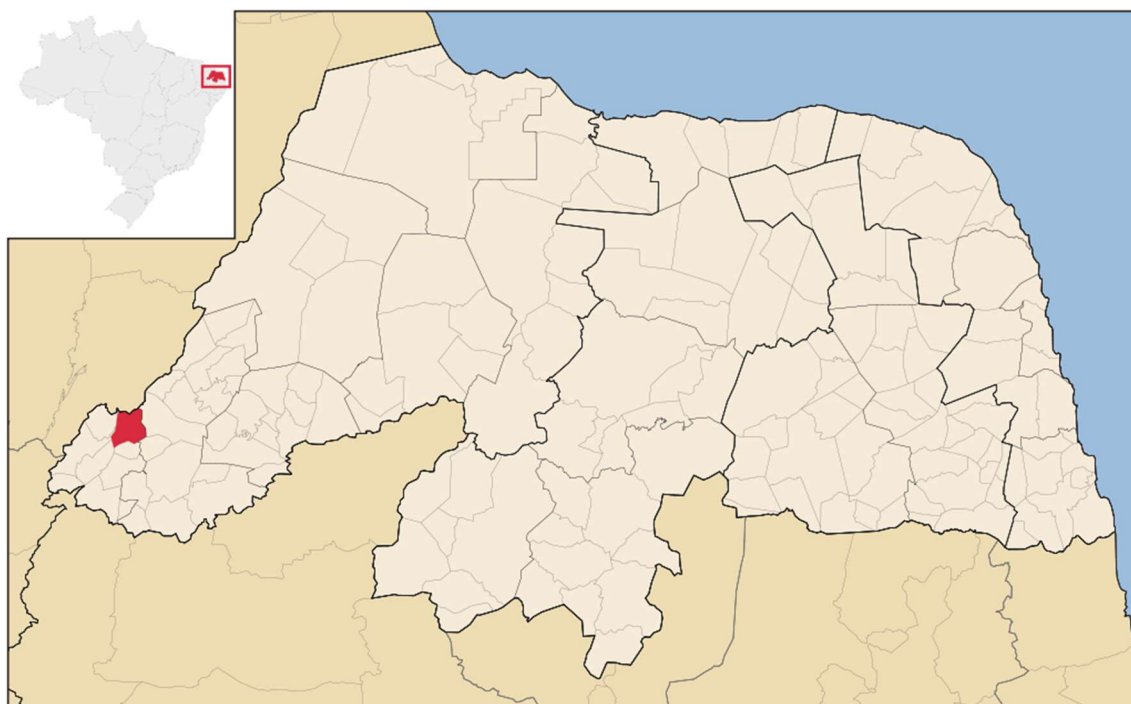


Figura 4.12: Localização de Encanto no Rio Grande do Norte

Fonte: WIKIPÉDIA

Sua economia é basicamente estruturada na agricultura, tendo uma renda média *per capita* de até um salário mínimo, proveniente do trabalho braçal, comércio, pesca, serviços públicos, pensões e aposentadorias. Devido a essa situação precária da economia local, o índice de migração, para grandes centros urbanos, do município cresce a cada ano. (ENCANTO, 2015).

A cidade tem como atrativo as festas religiosas, como a de São Sebastião, que ocorre entre os dias 10 e 20 de janeiro, e as festas juninas, tradicionais em todo o nordeste brasileiro, onde a população das cidades vizinhas e os moradores que migraram de lá, se reúnem para festejar. O açude da cidade, além de abastecer a cidade, também é um ponto de encontro dos moradores e vizinhos.





Figura 4.13: Cidade do Encanto, ao fundo o açude

Fonte: GOVERNO MUNICIPAL DO ENCANTO

O clima da cidade é semiárido, com precipitações mensais abaixo de 200 mm e média anual de 70 mm/mês e sua temperatura com mínimas de 23 °C e máximas 33 °C, conforme ilustra o gráfico a seguir:

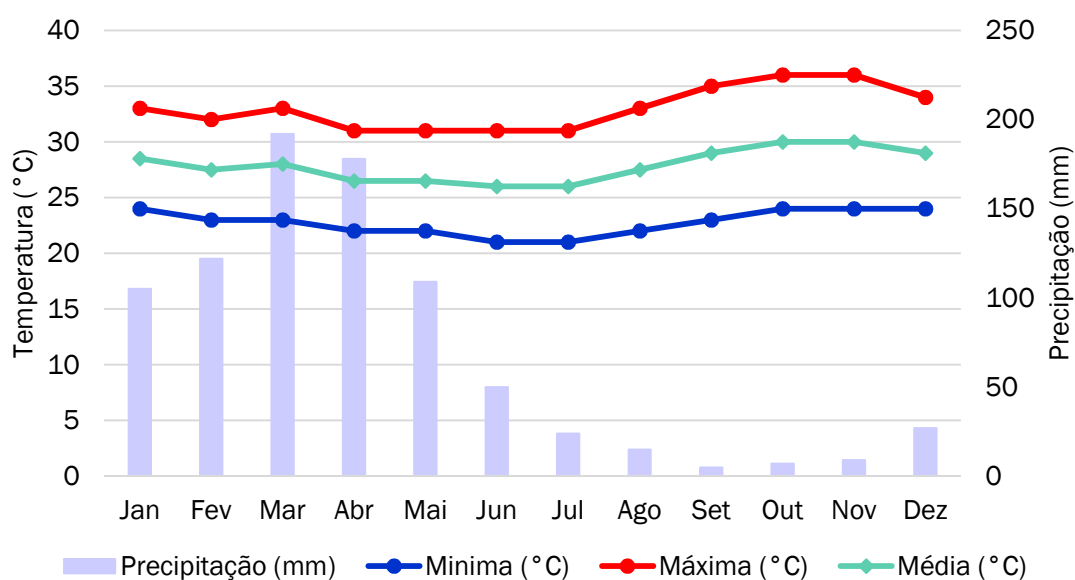


Gráfico 4.3: Comportamento da chuva e da temperatura ao longo do ano da cidade do Encanto<sup>1</sup>

Fonte: CLIMATEMPO

<sup>1</sup> As médias climatológicas são valores calculados a partir de um série de dados de 30 anos observados.

#### 4.3.1. Características do consumo elétrico do Encanto

O Encanto/RN é basicamente uma cidade residencial de pouquíssimos comércios, onde a população necessita ir às cidades vizinhas para comprar itens de necessidade básica, como por exemplo, alimentos e itens de higiene pessoal.

O consumo elétrico médio de uma residência com uma família de 4 pessoa, fica em torno de 102 kWh/mês. Visto que o uso de chuveiro elétrico é pouco difundido na cultura da população local, devido às elevadas temperaturas da região, outro fator é a baixa utilização de equipamentos eletroeletrônicos.

Em 2015, o consumo anual do município chegou a 4.210 MWh, onde 56% foi de utilização residencial e 17% rural. (COSERN, 2016)

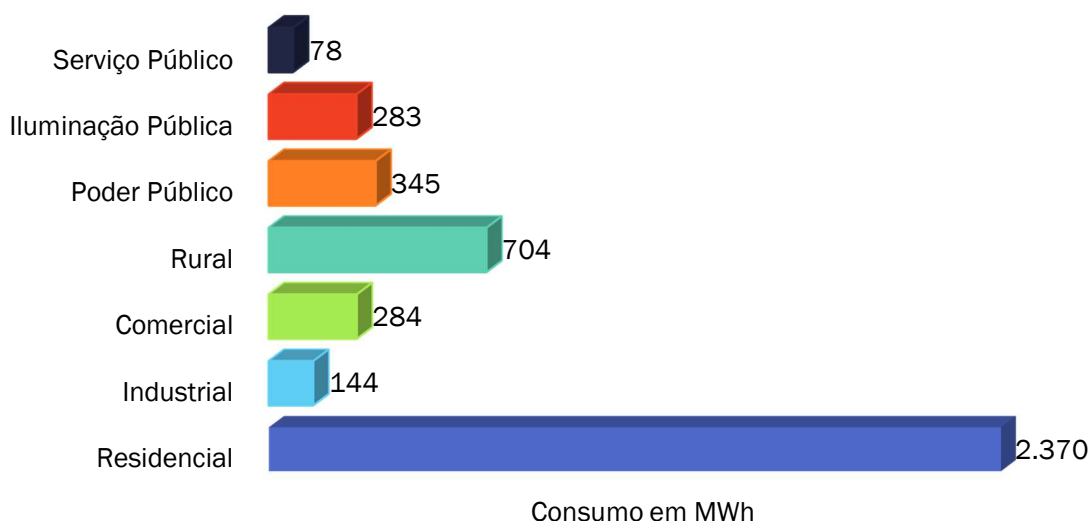


Gráfico 4.4: Consumo por setor de atendimento do ano de 2015

Fonte: Elaboração própria

Conforme dados da COSERN, no ano de 2015 foram contabilizadas 2.230 unidades consumidoras, e para o ano de 2016 a previsão é de que se atenda 2.279 unidades, onde 78% são consumidores residenciais. O aumento anual de consumidores está em torno de 2 a 3%. (COSERN, 2016) Um dos motivos para esse aumento foi a construção de um novo bairro na cidade, em 2014, chamado Antônio Cajazeiras.

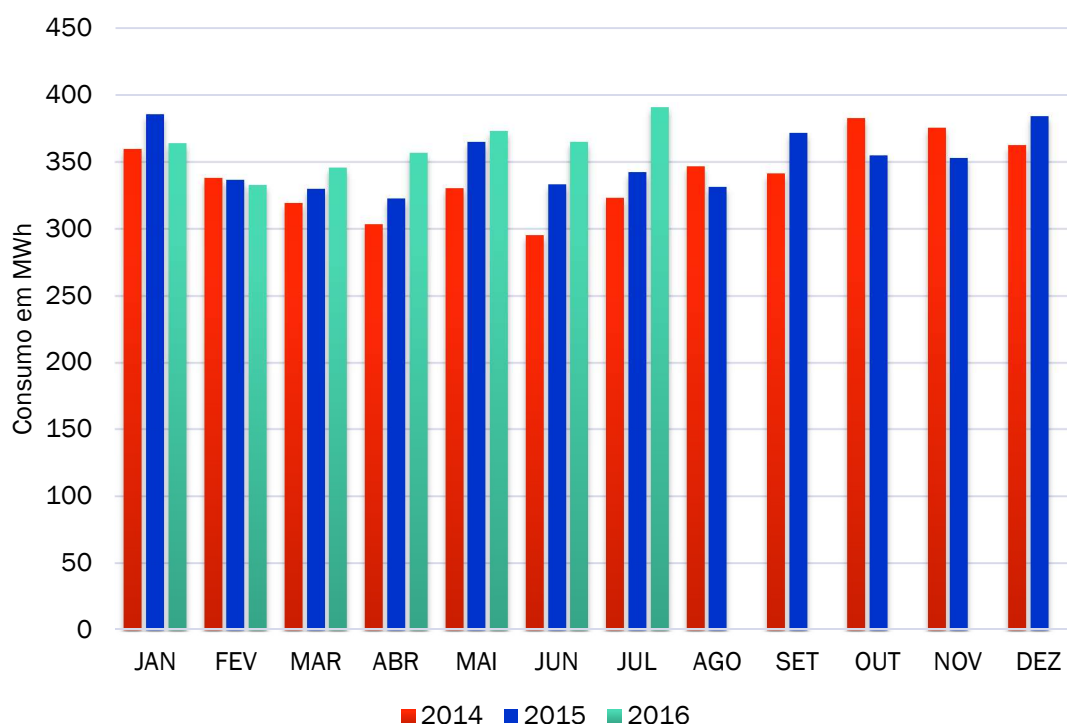


Gráfico 4.5: Consumo dos últimos 3 anos da cidade do Encanto<sup>2</sup>

Fonte: COSERN, 2016

Como pode-se observar, o consumo mensal da cidade se mantém em uma média de 300 a 350 MWh, os meses de maior consumo são os que a cidade está em festa e, conseqüentemente, recebe mais visitantes, que são em janeiro, devido a festa do padroeiro, de maio a julho com as festas juninas e dezembro com o Natal. Já o consumo residencial, como pode ser observado no gráfico a seguir, fica em torno de 200 MWh/mês.

<sup>2</sup> Os dados foram obtidos através de e-mail com a equipe da Unidade de Mercado da COSERN, no final de julho de 2016.



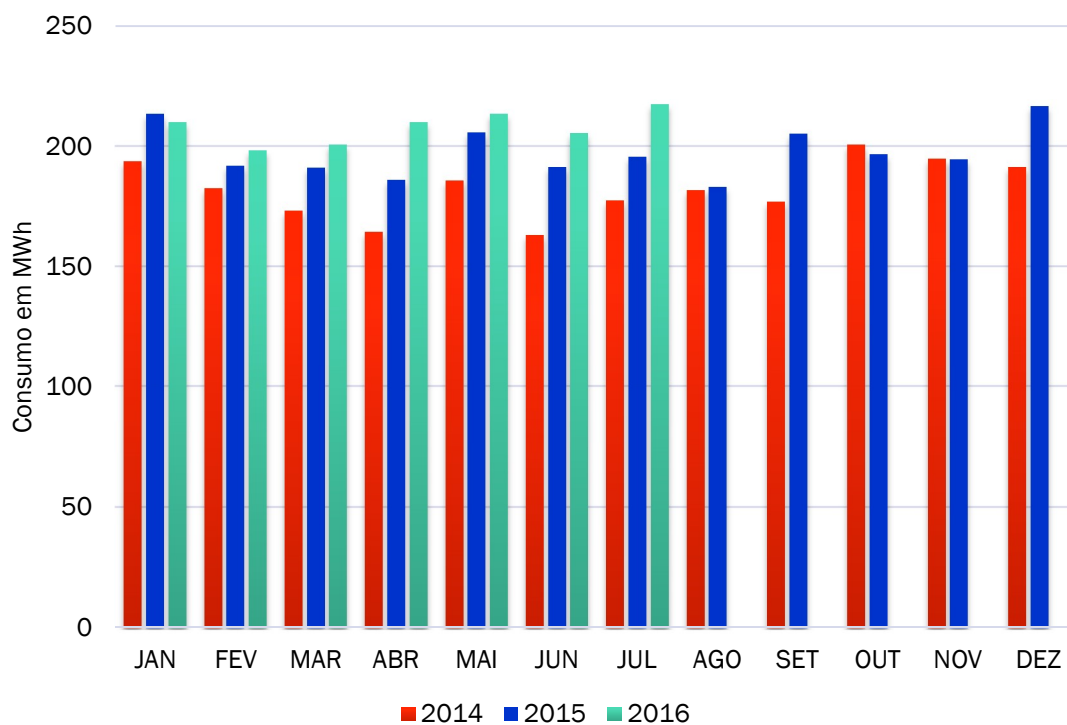


Gráfico 4.6: Consumo residencial dos últimos 3 anos da cidade do Encanto

Fonte: COSERN, 2016

Analisando os dados de 2016, a demanda residencial teve um crescimento de aproximadamente 15% em relação ao mesmo período de 2014.

## 5. DESENVOLVIMENTO

O estudo foi realizado com base nos dados da cidade do Encanto/RN. Essa cidade foi escolhida por ser basicamente residencial e encontrar-se em uma região geográfica do interior do estado, afim de verificar se existe viabilidade técnica para uma instalação similar da observada no litoral do Estado.

### 5.1. DADOS DA CIDADE

Abaixo, são apresentados alguns dados da cidade do Encanto para que seja feito o correto dimensionamento:

- Localização: Latitude: 6,139776° S e Longitude: 38,293711° O
- Altitude: 212 m
- Temperatura média: 28 °C (CLIMATEMPO)
- Consumo residencial anual (com base em 2015): 2.370 MWh (COSERN<sup>3</sup>)
- Consumo médio residencial (com base em 2015): 198 MWh/mês (COSERN<sup>3</sup>)
- Média de unidades consumidoras: 1.749 (COSERN<sup>3</sup>)

### 5.2. DADOS EÓLICOS

Através do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), obtém-se os dados do vento da localidade escolhida. Esses dados são retirados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, através do sistema MesoMap, que é um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, bases de dados meteorológicos e geográficos, redes de computadores e sistemas de armazenamento.

Tabela 5.1: Dados de vento a 50 m de altura da cidade do Encanto

| Atlas do Potencial Eólico Brasileiro |                  | Dados de vento a 50 m de Altura |         |         |         |       |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|-------|
| Grandeza                             | Unidade          | Dez-Fev                         | Mar-Mai | Jun-Ago | Set-Nov | Anual |
| Velocidade Média do Vento            | m/s              | 4,25                            | 3,11    | 4,31    | 5,17    | 4,21  |
| Fator c                              |                  | 4,8                             | 3,51    | 4,83    | 5,74    | 4,75  |
| Fator k                              |                  | 2,21                            | 2,02    | 2,92    | 3,52    | 2,41  |
| Densidade de Potência                | W/m <sup>2</sup> | 82                              | 35      | 70      | 110     | 74    |

Fonte: CRESESB

<sup>3</sup> Dados fornecidos pela equipe da COSERN em 2016, via e-mail.

Na tabela 5.1 verifica-se o pior caso, dados em vermelho, que acontece no outono e o melhor, em azul, na primavera e nos meses referentes ao verão e ao inverno, os cenários são quase o mesmo. Dessa forma, obtém-se o gráfico abaixo:

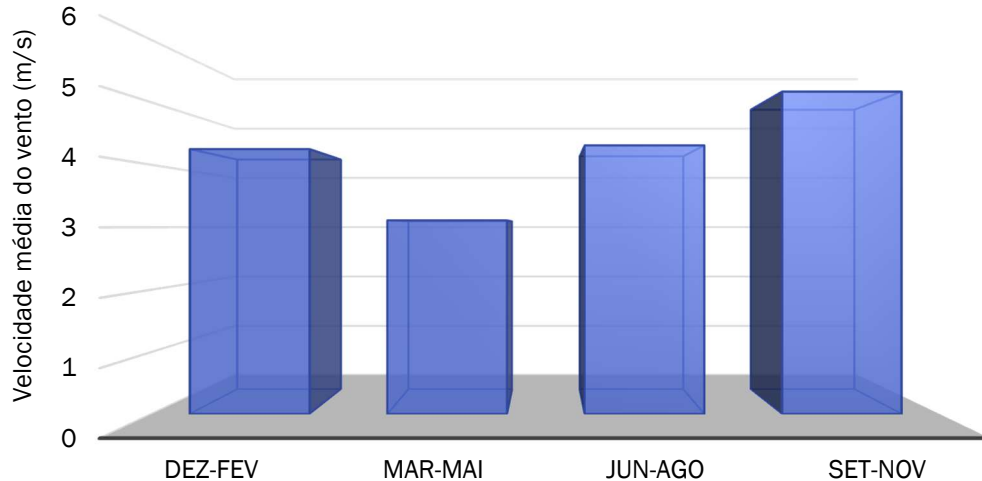


Gráfico 5.1: Velocidade Média Sazonal de Vento a 50 m de Altura [m/s] para a cidade do Encanto

Fonte: CRESESB

De posse desses valores, a distribuição de *Weibull* pode ser calculada. Essa probabilidade é utilizada para analisar os dados do vento, representando uma ampla variedade de regimes de ventos baseando-se em dois parâmetros, que são o fator de forma, representado pela letra  $k$  e o fator de escala, representado pela letra  $c$ . (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

Para o cálculo da distribuição de Weibull, utiliza-se a equação:

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

**Equação 5.1**

Onde  $f(v)$  = Função de densidade de probabilidade de Weibull.

A tabela 5.2 apresenta os valores correspondentes as variações no decorrer do ano, assim como uma média anual, dada pelo CRESESB, e com variação de velocidade dos ventos entre 0 e 15 m/s. Acima de 12 m/s, observa-se que a função se iguala a zero, ou seja, não existe ventos nessa ordem.

Tabela 5.2: Distribuição de Weibull

| $(\bar{v})$ | $f(\bar{v})$<br>Dez-Fev | $f(\bar{v})$<br>Mar-Mai | $f(\bar{v})$<br>Jun-Ago | $f(\bar{v})$ Set-<br>Nov | $f(\bar{v})$<br>Anual |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0           | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                    | 0,000                 |
| 1           | 0,067                   | 0,148                   | 0,029                   | 0,007                    | 0,055                 |
| 2           | 0,138                   | <b>0,235</b>            | 0,103                   | 0,042                    | 0,132                 |
| 3           | 0,183                   | 0,237                   | 0,189                   | 0,108                    | 0,191                 |
| 4           | <b>0,189</b>            | 0,179                   | <b>0,236</b>            | 0,186                    | <b>0,206</b>          |
| 5           | 0,162                   | 0,107                   | 0,214                   | <b>0,234</b>             | 0,176                 |
| 6           | 0,117                   | 0,052                   | 0,139                   | 0,213                    | 0,122                 |
| 7           | 0,073                   | 0,021                   | 0,064                   | 0,135                    | 0,069                 |
| 8           | 0,039                   | 0,007                   | 0,020                   | 0,057                    | 0,032                 |
| 9           | 0,018                   | 0,002                   | 0,004                   | 0,015                    | 0,012                 |
| 10          | 0,007                   | 0,000                   | 0,001                   | 0,002                    | 0,004                 |
| 11          | 0,002                   | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                    | 0,001                 |
| 12          | 0,001                   | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                    | 0,000                 |
| 13          | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                    | 0,000                 |
| 14          | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                    | 0,000                 |
| 15          | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                   | 0,000                    | 0,000                 |

Fonte: Elaboração própria

Observando o gráfico abaixo, de acordo com a estação do ano, os ventos possuem uma velocidade constante diferente com menor variação, tendo uma média anual de ventos na ordem dos 4 m/s com pouca variação e acima de 8 m/s com maior flutuação.

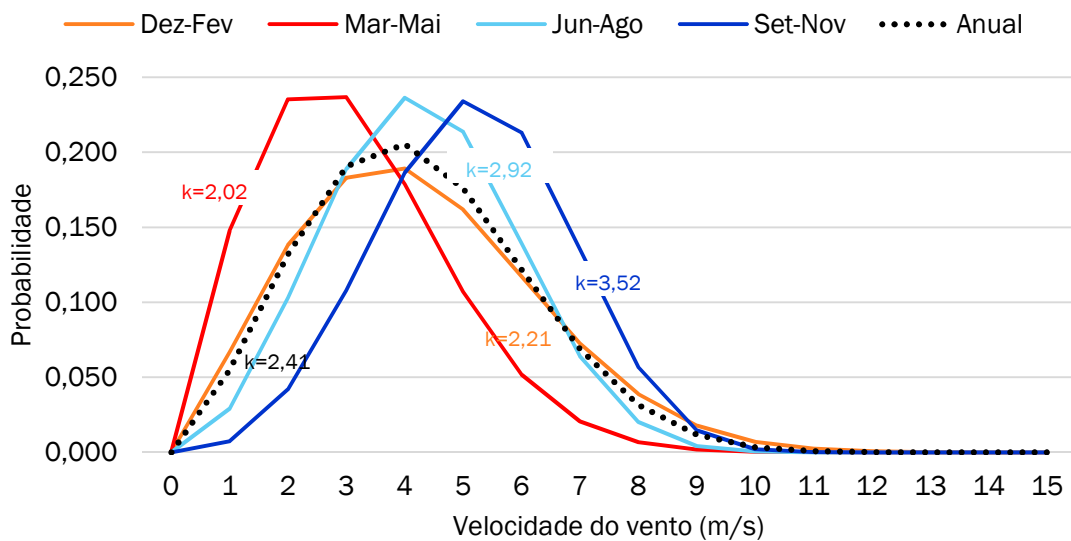


Gráfico 5.2: Função de Distribuição de Weibull

Fonte: Elaboração própria

### 5.3. CARACTERÍSTICAS DO AEROGERADOR

A turbina escolhida para o estudo é a SA-70 da ROPATEC, empresa italiana, fundada em 1995 pelo *Ropatec Robert Niederkofler*, que desenvolve aerogeradores de eixo vertical. A utilização desse tipo de turbina se dá devido a ventos fracos, abaixo de 5 m/s.



Figura 5.1: Turbina SA-70

Fonte: ROPATEC

#### Principais características:

- Potência: 10 kW;
- Redução de componentes, facilitando a montagem (prazo de 1 dia);
- Sistema de ajuste da curva de potência em função das características relevantes do vento;
- Baixo custo de manutenção; (ROPATEC, 2016)

Tabela 5.3: Configuração da turbina SA-70

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Modelo                        | AS-70          |
| Classe de vento (IEC 61400-2) | III            |
| Vida útil de projeto          | 30 anos        |
| Diâmetro do rotor             | 7,8 m          |
| Comprimento da lâmina         | 9 m            |
| Torre                         | 18 m           |
| Controle de potência          | SIL3           |
| Gerador                       | Ímã permanente |
| Material da lâmina            | Fibra de vidro |

Fonte: ROPATEC

Tabela 5.4: Desempenho da turbina SA-70

|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Potência                     | 10 kW               |
| Velocidade de vento nominal  | 9,7 m/s             |
| Velocidade de vento inicial  | ca. 3 m/s           |
| Velocidade de vento de corte | 19 m/s              |
| Temperatura de operação      | -20 °C / +55 °C     |
| Área de varredura            | 70,2 m <sup>2</sup> |

Fonte: ROPATEC

É importante verificar a curva de potência em relação a velocidade do vento. No gráfico abaixo observa-se duas curvas, uma com a densidade do vento de 1,225 kg/m<sup>3</sup> (ao nível do mar) e a outra corrigida, de acordo com a equação 5.3, com valor de 1,14 kg/m<sup>3</sup>.

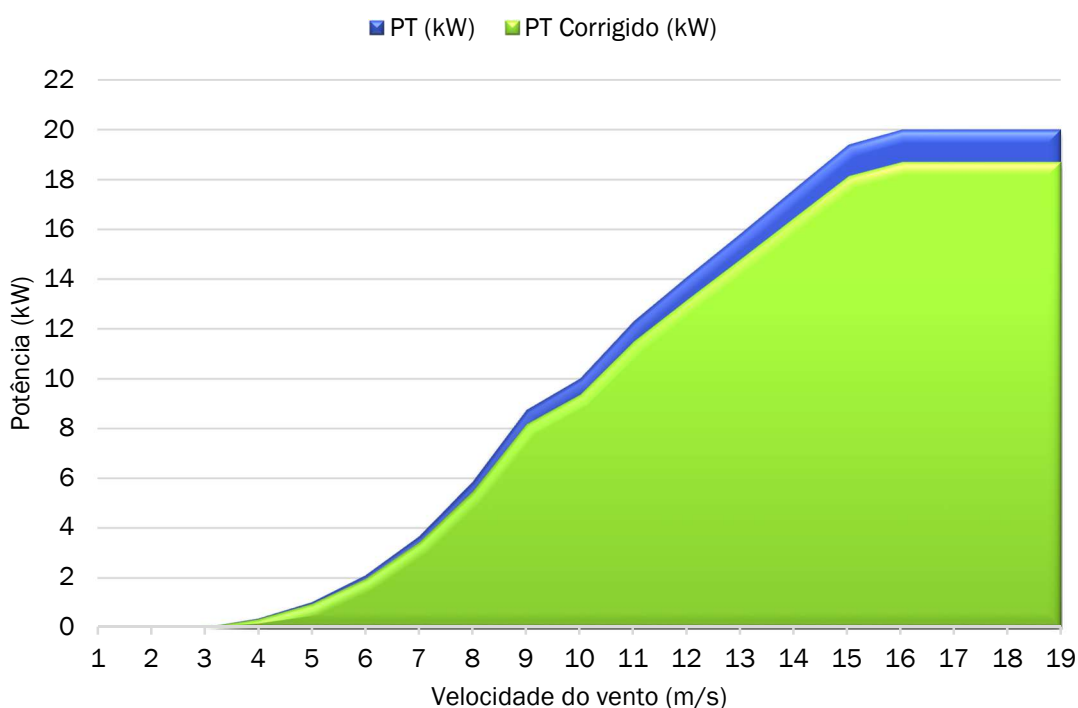








Gráfico 5.3: Curva de potência nominal da turbina SA-70

Fonte: ROPATEC

Com uma superfície de 70,2 m<sup>2</sup>, a turbina permite a geração de 24.000 kWh de energia por ano, com uma velocidade média do vento de 5,5 m/s. A tabela a seguir, mostra a produção de energia anual (produção ao nível do mar com fator de forma  $k=2$  na distribuição de Weibull) em relação a velocidade média do vento anual e a

redução de CO<sub>2</sub>, com base na média europeia (EU-27) de referência de 0,45 t/MWh. (ROPATEC, 2016)

Tabela 5.5: Produção de energia anual da turbina SA-70

| Average annual wind speed [m/s] | [kWh] per year | Self-consumption coverage per household   | CO <sub>2</sub> EMISSION ANNUAL SAVING |
|---------------------------------|----------------|---|--|
| 4,5                             | 14150          |  | 6,4 t                                  |
| 5                               | 19000          |  | 8,5 t                                  |
| 5,5                             | 23950          |  | 10,8 t                                 |
| 6                               | 28800          |  | 13,0 t                                 |
| 6,5                             | 33400          |  | 15,0 t                                 |
| 7                               | 37650          |  | 17,0 t                                 |

Fonte: ROPATEC

Com base nesses dados, traça-se a curva do coeficiente de potência, que é uma medida adimensional do quanto de energia pode-se absorver do vento. É obtido através do limite de *Betz*, onde o coeficiente máximo é  $C_{P,máx} = 16/27 = 0,5926$ . Na prática existem três efeitos que podem fazer com que esse coeficiente diminua: (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

- Número finitos de lâminas e as perdas de pontas associadas;
- Rotação da esteira por trás do rotor;
- Arrasto aerodinâmico diferente de zero. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

Obtém-se o  $C_P$  através da fórmula:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} = \frac{\text{Potência do rotor } (P_T)}{\text{Potência do vento } (P_V)}$$

**Equação 5.2**

Onde,

$\rho$  = densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = velocidade do vento (km/h)

$A$  = área de varredura (m<sup>2</sup>)

Para calcular o valor da densidade do ar, utiliza-se a equação a seguir, que leva em consideração a temperatura e a altitude do local:

$$\rho = \frac{353,4 \left(1 - \frac{H_m}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + T}$$

**Equação 5.3**

Onde:

$H_m$  = altitude do local (m)

$T$  = temperatura (°C)

Utilizando os valores da cidade escolhida:

$$\rho = \frac{353,4 \left(1 - \frac{212}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + 28}$$

$$\rho = 1,14 \text{ kg/m}^3$$

**Resultado 5.1**

O gráfico abaixo corresponde à representação da evolução do coeficiente de potência para diferentes valores de velocidade do vento. Observa-se que a eficiência mecânica máxima da turbina (27,88 %) ocorre para uma velocidade do vento igual a 9 m/s, porém a região escolhida tem uma média anual de 4,2 m/s, aproveitando pouco menos da metade da energia que poderia ser obtida no seu pico.

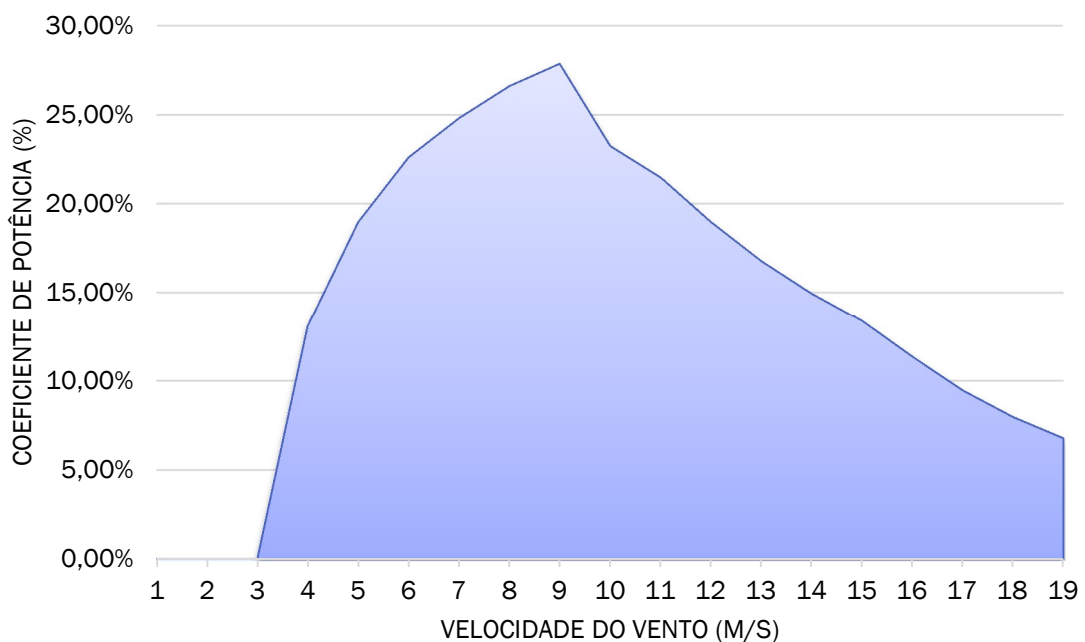


Gráfico 5.4: Variação do Coeficiente de Potência

Fonte: Elaboração própria



A tabela apresentada abaixo mostra os valores do coeficiente de potência calculados a diferentes velocidades do vento:

Tabela 5.6: Coeficiente de potência

| Velocidade do vento (m/s) | $P_T$ (kW) | $P_{T \text{ Corrigido}}$ (kW) | $P_V$ (kW) | CP (%) |
|---------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------|
| 1                         | 0          | 0,0                            | 0,0        | 0,00%  |
| 2                         | 0          | 0,0                            | 0,3        | 0,00%  |
| 3                         | 0          | 0,0                            | 1,1        | 0,00%  |
| 4                         | 0,4        | 0,3                            | 2,6        | 13,08% |
| 5                         | 1,0        | 1,0                            | 5,0        | 18,98% |
| 6                         | 2,1        | 2,0                            | 8,7        | 22,61% |
| 7                         | 3,7        | 3,4                            | 13,8       | 24,82% |
| 8                         | 5,9        | 5,5                            | 20,6       | 26,62% |
| 9                         | 8,7        | 8,2                            | 29,3       | 27,88% |
| 10                        | 10         | 9,3                            | 40,2       | 23,26% |
| 11                        | 12,3       | 11,5                           | 53,5       | 21,49% |
| 12                        | 14,1       | 13,2                           | 69,4       | 18,98% |
| 13                        | 15,85      | 14,8                           | 88,3       | 16,78% |
| 14                        | 17,63      | 16,5                           | 110,3      | 14,94% |
| 15                        | 19,4       | 18,1                           | 135,6      | 13,37% |
| 16                        | 20         | 18,7                           | 164,6      | 11,36% |
| 17                        | 20         | 18,7                           | 197,4      | 9,47%  |
| 18                        | 20         | 18,7                           | 234,4      | 7,98%  |
| 19                        | 20         | 18,7                           | 275,6      | 6,78%  |

Fonte: Elaboração própria

Utilizando os valores do coeficiente de potência multiplicados pela potência do vento, será obtido a potência da turbina (corrigida).

#### 5.4. CURVA DE DENSIDADE DE POTÊNCIA

A densidade de potência que a energia disponível por unidade de área pode ser obtida tanto para o vento quanto para a turbina, através da seguinte equação: (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

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

**Equação 5.4**

A partir dela, são elaboradas as curvas do vento e da turbina:

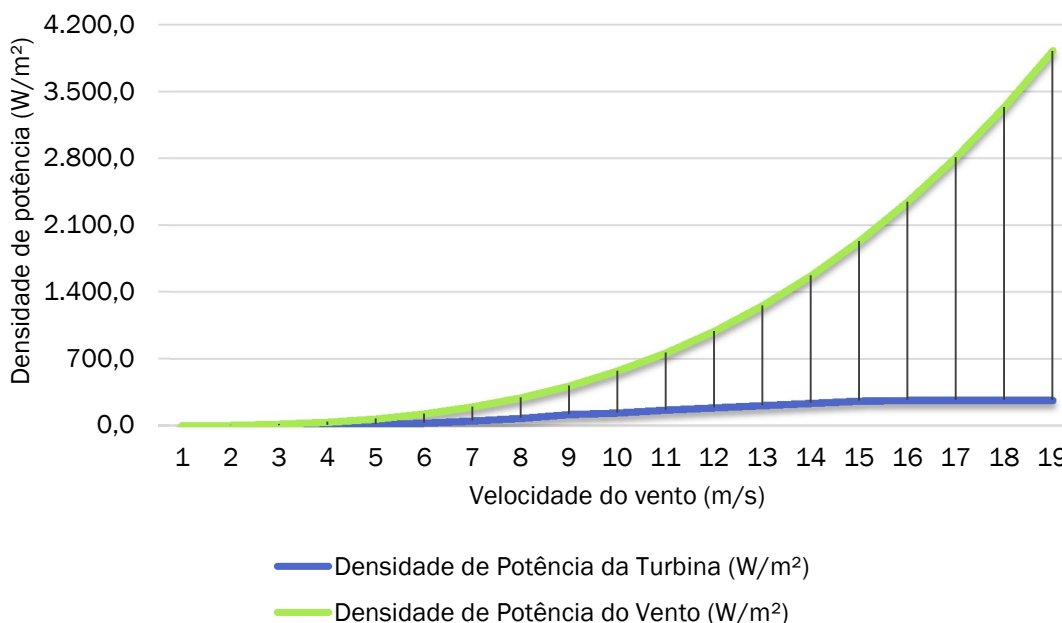


Gráfico 5.5: Curva de densidade de potência  
Fonte: Elaboração própria

A diferença entre as curvas da turbina e do vento é exatamente o coeficiente de potência conforme informado no tópico 5.3.

## 5.5. PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA

Para se obter a energia produzida em um ano pelo aerogerador, é necessário o número de ocorrência dos ventos<sup>4</sup> em determinadas velocidades, para que possa ser extraída a frequência em que ocorrem. De posse desses valores utiliza-se a equação abaixo:

<sup>4</sup> Para se obter o número de ocorrências dos ventos e consequentemente a sua frequência, foi utilizado dados obtidos diariamente no portal <http://www.climatempo.com.br>, ao qual informa a velocidade e a direção dos ventos, na cidade do Encanto, no decorrer das 24h. O número de amostragem foi de 12 dias. Para obter resultados mais completos, é necessário ter a frequência de ocorrência dos ventos durante todo o ano.

$$EP(ano) = \sum fr_i \times P_i \times \Delta t$$

**Equação 5.5**

Onde,

$fr_i$  = frequência de ocorrência

$P_i = P_T$  = Potência do rotor

$\Delta t$  = variação do tempo

Para a variação do tempos, é aplicado o valor de 8.760h/ano, que é o produto entre o número de dias do ano pela quantidade de horas do dia.

Tabela 5.7: Variação na velocidade do vento

| Velocidade do vento (m/s) | Número de ocorrências | Frequência de ocorrência (%) | $P_T$ Corrigido (kW) | $F(v) \times P_T(v)$ (kW) |
|---------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1                         | 0                     | 0%                           | 0,0                  | 0,000                     |
| 2                         | 0                     | 0%                           | 0,0                  | 0,000                     |
| 3                         | 17                    | 6%                           | 0,0                  | 0,000                     |
| 4                         | 109                   | 38%                          | 0,3                  | 0,127                     |
| 5                         | 95                    | 33%                          | 1,0                  | 0,314                     |
| 6                         | 59                    | 20%                          | 2,0                  | 0,402                     |
| 7                         | 7                     | 2%                           | 3,4                  | 0,083                     |
| 8                         | 0                     | 0%                           | 5,5                  | 0,000                     |
| 9                         | 0                     | 0%                           | 8,2                  | 0,000                     |
| 10                        | 0                     | 0%                           | 9,3                  | 0,000                     |
| 11                        | 0                     | 0%                           | 11,5                 | 0,000                     |
| 12                        | 0                     | 0%                           | 13,2                 | 0,000                     |
| 13                        | 0                     | 0%                           | 14,8                 | 0,000                     |
| 14                        | 0                     | 0%                           | 16,5                 | 0,000                     |
| 15                        | 0                     | 0%                           | 18,1                 | 0,000                     |
| 16                        | 0                     | 0%                           | 18,7                 | 0,000                     |
| 17                        | 0                     | 0%                           | 18,7                 | 0,000                     |
| 18                        | 0                     | 0%                           | 18,7                 | 0,000                     |
| 19                        | 0                     | 0%                           | 18,7                 | 0,000                     |
| TOTAL (kW)                |                       |                              |                      | 0,927                     |

Fonte: Elaboração própria

Após os cálculos obtidos na tabela 5.7, utilize a equação V:

$$EP(ano) = 0,927 \times 8.760$$

$$EP(ano) = 8.120,47 \text{ kWh}$$

**Resultado 5.2**

Com isso, sabe-se que cada turbina produzirá 8,1 MWh anualmente.

## 5.6. FATOR DE CAPACIDADE

Outra forma de interpretar a produção anual de energia de uma turbina eólica é através do denominado fator de capacidade da turbina FC, referente ao local onde está instalada.

Define-se por fator de capacidade de uma turbina eólica, o quociente entre a produção de energia anual (EP) pela a energia que a turbina teoricamente produziria se operasse constantemente com sua potência nominal  $P_N$  (máxima) durante as 8.760 horas do ano. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS; 2009)

A turbina do estudo tem uma potência nominal  $P_N = 10 \text{ kW}$ . Para este caso, o fator de carga da turbina eólica tem o seguinte valor:

$$F_c = \frac{EP}{8760 \times P_N}$$

**Equação 5.6**

$$F_c = \frac{8.120,47}{8760 \text{ horas} \times 10}$$

$$F_c = 0,0927 = 9,27\%$$

**Resultado 5.3**

## 5.7. QUANTIDADE DE AEROGERADORES E ÁREA DO PARQUE

A proposta do trabalho é gerar energia para suprir a demanda residencial da cidade do Encanto que é de 2.370 MWh/ano. Para saber a quantidade necessária de aerogeradores para esse atendimento, utiliza-se a fórmula a seguir:

$$Qtd = \frac{MWh \text{ necessário}}{MWh \text{ cada aerogerador}}$$

**Equação 5.7**

$$Qtd = \frac{2.370}{8,1}$$

$$Qtd = 291 \text{ aerogeradores}$$

**Resultado 5.4**

Com isso, é necessário definir, através da equação VIII, a área que será ocupada pelo parque:

$$A_p = \frac{45}{2} D^2 (n + 2)$$

**Equação 5.8**

Onde,

$A_p$  = área total ocupada pela fazenda eólica ( $m^2$ )

$D$  = diâmetro do rotor da turbina (m)

$n$  = número de aerogeradores no parque eólico

$$A_p = \frac{45}{2} \times 7,8^2 \times (291 + 2)$$

$$A_p = 401.087,70 \text{ m}^2 \cong 0,401 \text{ km}^2$$

**Resultado 5.5**

## 5.8. ANÁLISE FINANCEIRA

Em contato com a empresa, não foi possível conseguir o valor atual da turbina escolhida. Foi realizado uma pesquisa de preços, principalmente em site da China, onde o valor de turbinas com as mesmas características ficam em torno de US \$ 18.550,00 cada, com todos os equipamentos.

Para fazer o estudo de viabilidade, se faz necessário converter o valor da turbina para a moeda brasileira. Será utilizado a cotação fechada no dia 07 de novembro de 2016, que foi de R\$ 3,2024 (BCB, 2016).

$$\text{Preço da turbina (R\$)} = \text{Preço (US \$)} \times \text{Cotação (R\$)}$$

**Equação 5.9**

$$\text{Preço da turbina (R\$)} = 18.550,00 \times 3,2024$$

$$\text{Preço da turbina (R\$)} = \mathbf{59.404,5200}$$

**Resultado 5.6**

O valor obtido acima é de uma única unidade. O valor do investimento no parque é obtido abaixo:

$$\text{Investimento} = \text{Preço da turbina (R\$)} \times Qtd$$

**Equação 5.10**

$$\text{Investimento} = 59.404,52 \times 291$$

$$\text{Investimento} = \mathbf{R\$ 17.286.715,32}$$

**Resultado 5.7**

O valor do fluxo de caixa, que é o valor ao qual se deixaria de pagar com a conta de energia elétrica, é a próxima etapa a ser calculada, desta maneira:

$$\text{Fluxo de caixa} = \text{Custo da energia (com impostos)}^5 \times EP (kWh) \times Qtd$$

**Equação 5.11**

$$\text{Fluxo de caixa} = 0,43551783 \times 8.120,47 \times 291$$

$$\text{Fluxo de caixa} = \mathbf{R\$ 1.029.153,36}$$

**Resultado 5.8**

Porém deve-se levar em conta que os consumidores terão que pagar uma taxa mínima para continuarem conectados à rede, para eventual falha do sistema proposto.

Cada consumidor terá que pagar uma taxa mínima de 30 kWh/mês, prevista na REN n° 479/2012. Desta forma:

---

<sup>5</sup> Esse valor pode ser encontrado na tabela de tarifas do grupo B, no portal da Concessionária COSERN (<http://www.cosern.com.br/>). Atentar-se a vigência da tabela disponibilizada, a qual foi usada a de outubro de 2016.

**Fluxo de caixa (final)**

$$= \text{Fluxo de caixa} - n^{\circ} \text{ de consumidores} \times \text{taxa mínima (kWh)} \\ \times \text{Custo da energia} \times n^{\circ} \text{ de meses do ano}$$

**Equação 5.12**

$$\text{Fluxo de caixa (final)} = 1.029.153,36 - 1740 \times 30 \times 0,43551783 \times 12$$

$$\text{Fluxo de caixa (final)} = \text{R\$ } 756.344,99$$

**Resultado 5.9**

A análise financeira será constituída pelos métodos do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback Simples e Descontado e terá 3 cenários, sendo: um mais realista, um pessimista e um otimista.

- **Valor Presente Líquido:** é a diferença do Valor Presente (VP) dos fluxos de caixa futuro pelo seu investimento inicial. (GROPPELLI; NIKBAKHT, 1998).

$$VPL = -II_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} + \dots + \frac{VR}{(1 + TMA)^n}$$

**Equação 5.13**

Onde:

- $II_0$  é o investimento inicial;
  - $FC_t$  é o fluxo de caixa líquido na data “t”;
  - TMA é a taxa mínima de atratividade, custo de capital definido pela empresa (investidores);
  - VR é o valor residual do projeto ao final do período de análise (enésimo período); (GROPPELLI; NIKBAKHT, 1998).
- 
- **Taxa Interna de Retorno:** é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial. Na prática, a TIR é uma taxa de desconto que torna o resultado da VPL igual a zero (RÊGO; PAULO; SPRITZER; ZOTES, 2010).

$$VPL = -II_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} + \dots + \frac{VR}{(1 + TIR)^n} = 0$$

**Equação 5.14**

- **Payback:** Tempo que levar para se ter um retorno do investimento inicial. Se todos os fluxos forem iguais, calcula-se:

$$Payback = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Fluxo de caixa anual}}$$

**Equação 5.15**

### 5.8.1. Cenário realista

O cenário realista apresentará características de acordo com o que está acontecendo no momento no país, ou seja, ajustes, taxas, acréscimos o mais próximo do real.

Neste caso será utilizado uma taxa de 7,78%<sup>6</sup> ao ano no fluxo de caixa, que representa o aumento que a tarifa de energia.

Para os cálculos deve-se utilizar os valores calculados nas equações X e XII:

- **II<sub>0</sub>:** R\$ 18.118.378,6
- **FC (inicial):** R\$ 756.344,99
- **TMA:** 8,5%

---

<sup>6</sup> Esse reajuste ocorreu em abril de 2016, pela Aneel, e pode ser obtido no site [www.cosern.com.br/Noticias](http://www.cosern.com.br/Noticias).



Tabela 5.8: Fluxo de caixa do Cenário Realista

| ANO   | FLUXO CX           | FLUXO CX SIMPLES   | VALOR PRESENTE    | FLUXO CX ACUM AJ   |
|-------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 0     | -R\$ 18.118.378,60 | -R\$ 18.118.378,60 |                   | -R\$ 18.118.378,60 |
| 1     | R\$ 756.344,99     | -R\$ 17.362.033,61 | R\$ 697.092,16    | -R\$ 17.421.286,44 |
| 2     | R\$ 815.188,63     | -R\$ 16.546.844,98 | R\$ 692.466,29    | -R\$ 16.728.820,15 |
| 3     | R\$ 878.610,31     | -R\$ 15.668.234,67 | R\$ 687.871,12    | -R\$ 16.040.949,03 |
| 4     | R\$ 946.966,19     | -R\$ 14.721.268,49 | R\$ 683.306,45    | -R\$ 15.357.642,58 |
| 5     | R\$ 1.020.640,16   | -R\$ 13.700.628,33 | R\$ 678.772,07    | -R\$ 14.678.870,51 |
| 10    | R\$ 1.484.443,07   | -R\$ 7.275.348,32  | R\$ 656.547,52    | -R\$ 11.351.979,76 |
| 15    | R\$ 2.159.008,96   | R\$ 2.069.730,19   | R\$ 635.050,66    | -R\$ 8.134.018,99  |
| 20    | R\$ 3.140.113,46   | R\$ 15.661.432,41  | R\$ 614.257,65    | -R\$ 5.021.421,58  |
| 25    | R\$ 4.567.054,95   | R\$ 35.429.524,13  | R\$ 594.145,46    | -R\$ 2.010.737,71  |
| 28    | R\$ 5.718.087,21   | R\$ 51.375.315,51  | R\$ 582.395,63    | -R\$ 251.853,15    |
| 29    | R\$ 6.162.954,39   | R\$ 57.538.269,90  | R\$ 578.530,88    | R\$ 326.677,73     |
| 30    | R\$ 6.642.432,24   | R\$ 64.180.702,14  | R\$ 574.691,78    | R\$ 901.369,51     |
| TOTAL | R\$ 82.299.080,74  | R\$ 64.180.702,14  | R\$ 19.019.748,11 | R\$ 901.369,51     |

Fonte: Elaboração própria

O gráfico abaixo é um comparativo entre o fluxo de caixa e o valor presente, onde pode ser verificado que quanto mais distante está o montante a se receber no fluxo de caixa, menos ele vale monetariamente no presente.

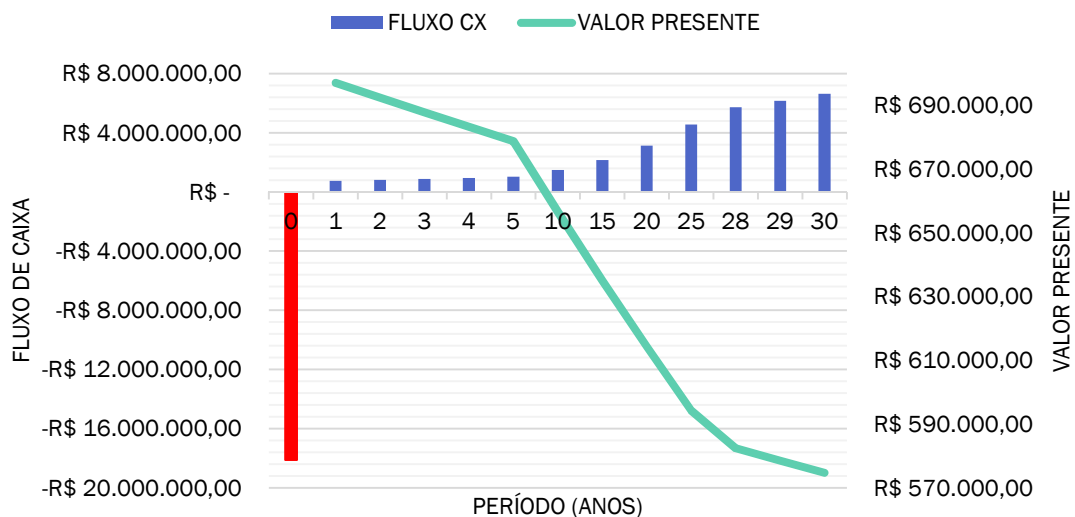


Gráfico 5.6: Fluxo de caixa x Valor Presente Líquido do Cenário Realista

Fonte: Elaboração própria

Já o gráfico 5.7, mostra a diferença entre um fluxo de caixa simples, o qual não envolve nenhuma taxa, e o acumulado, este por sua vez leva em consideração o

valor presente, ao qual é aplicado a taxa de atratividade de 8,5%<sup>7</sup>, por este motivo existe essa diferença tão grande entre os fluxos.

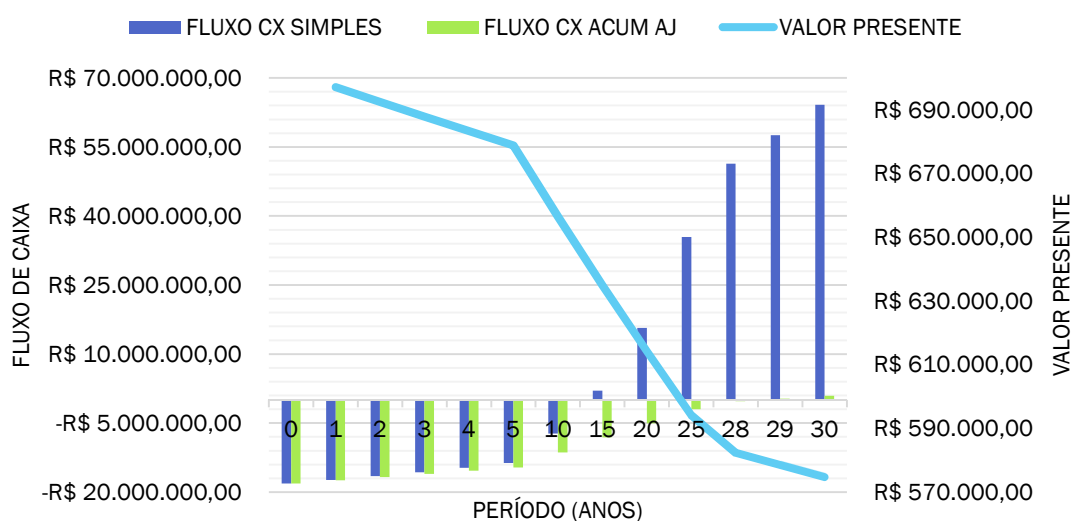


Gráfico 5.7: Fluxo de caixa Simples x Acumulado do Cenário Realista

Fonte: Elaboração própria

O resultado obtido nesse cenário foi:

Tabela 5.9: Resultado do Cenário Realista

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| VPL             | R\$ 901.369,51    |
| TIR             | 8,85%             |
| PAYBACK SIMPLES | 14 anos           |
| PAYBACK         | 28 anos e 5 meses |

Fonte: Elaboração própria

Para essa simulação, o resultado é praticamente igual ao de não fazer o parque, pois por mais que o VPL tenha dado um valor positivo, a TIR foi quase a mesma que o TMA e o payback é aproximadamente 2 anos a menos que a vida útil das turbinas.

### 5.8.2. Cenário otimista

No cenário otimista será utilizado uma taxa de 20% ao ano no fluxo de caixa, mostrando um aumento duas vezes e meia do real. Os valores de investimento

<sup>7</sup> Para a taxa de atratividade foi utilizado a mesma taxa da inflação, obtida através do site [www.bcb.gov.br](http://www.bcb.gov.br).

inicial, fluxo de caixa 1 e taxa mínima de atratividade permanecem os mesmos que o utilizado anteriormente.

Tabela 5.10: Fluxo de caixa do Cenário Otimista

| ANO   | FLUXO CX           | FLUXO CX SIMPLES   | VP                 | FLUXO CX ACUM AJ   |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0     | -R\$ 18.118.378,60 | -R\$ 18.118.378,60 |                    | -R\$ 18.118.378,60 |
| 1     | R\$ 758.834,66     | -R\$ 17.359.543,94 | R\$ 699.386,78     | -R\$ 17.418.991,82 |
| 2     | R\$ 910.601,59     | -R\$ 16.448.942,35 | R\$ 773.515,34     | -R\$ 16.645.476,48 |
| 3     | R\$ 1.092.721,91   | -R\$ 15.356.220,44 | R\$ 855.500,83     | -R\$ 15.789.975,65 |
| 4     | R\$ 1.311.266,29   | -R\$ 14.044.954,15 | R\$ 946.176,04     | -R\$ 14.843.799,61 |
| 5     | R\$ 1.573.519,55   | -R\$ 12.471.434,59 | R\$ 1.046.461,98   | -R\$ 13.797.337,63 |
| 10    | R\$ 3.915.420,17   | R\$ 1.579.969,11   | R\$ 1.731.733,23   | -R\$ 6.646.681,02  |
| 13    | R\$ 6.765.846,05   | R\$ 18.682.524,41  | R\$ 2.342.801,62   | R\$ 270.315,28     |
| 14    | R\$ 8.119.015,26   | R\$ 26.801.539,68  | R\$ 2.591.117,00   | R\$ 2.320.801,72   |
| 15    | R\$ 9.742.818,32   | R\$ 36.544.357,99  | R\$ 2.865.751,52   | R\$ 5.186.553,24   |
| 20    | R\$ 24.243.249,67  | R\$ 123.546.946,12 | R\$ 4.742.376,94   | R\$ 24.768.731,58  |
| 25    | R\$ 60.324.963,02  | R\$ 340.037.226,21 | R\$ 7.847.902,70   | R\$ 57.174.217,71  |
| 30    | R\$ 150.107.811,98 | R\$ 878.734.319,97 | R\$ 12.987.069,03  | R\$ 110.800.301,22 |
| TOTAL | R\$ 896.852.698,57 | R\$ 878.734.319,97 | R\$ 128.918.679,82 | R\$ 110.800.301,22 |

Fonte: Elaboração própria

Neste caso, verifica-se que o fluxo de caixa foi bem maior que o anterior, trazendo um VP com valor crescendo proporcionalmente com o fluxo.

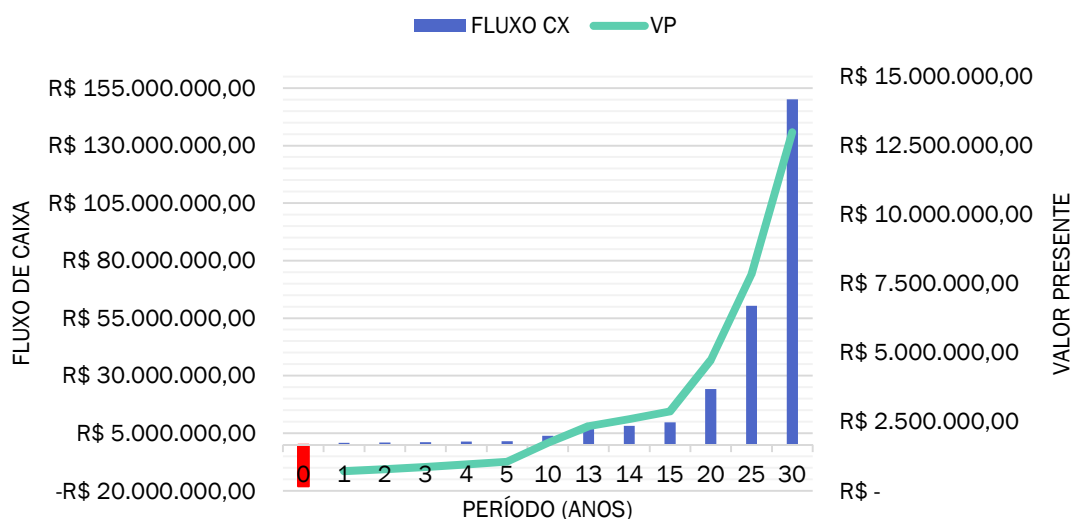


Gráfico 5.8: Fluxo de caixa x Valor Presente Líquido do Cenário Otimista

Fonte: Elaboração própria

No gráfico abaixo, mostra a diferença entre um fluxo de caixa simples tem os primeiros anos bem próximos que o ajustado. Verifica-se que a diferença entre elas

é bem grande, sendo até 20% superior, ou seja, o mesmo valor utilizado no ajuste do fluxo de caixa sobre o preço de energia anual.

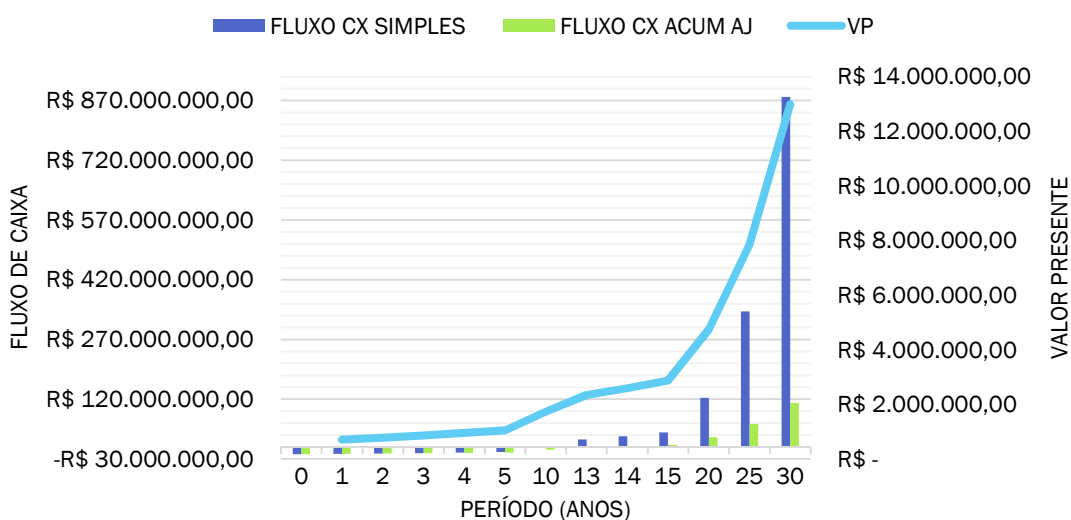


Gráfico 5.9: Fluxo de caixa Simples x Acumulado do Cenário Otimista

Fonte: Elaboração própria

Resultando em:

Tabela 5.11: Resultado do Cenário Otimista

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| VPL             | R\$ 110.800.301,22 |
| TIR             | 20,36%             |
| PAYBACK SIMPLES | 9 anos e 6 meses   |
| PAYBACK         | 13 anos e 1 mês    |

Fonte: Elaboração própria

O VPL é maior que 0, dessa forma o projeto se torna viável e para sustentar essa análise, a TIR obteve um resultado 2,5 vezes maior que a taxa de atratividade escolhida. O prazo de amortização do investimento também está bem aceitável, menos da metade da vida útil do parque.

### 5.8.3. Cenário pessimista

Para este cenário a taxa anual do fluxo de caixa será de 0,5%, para demonstrar um caso de se o preço da energia recuar a ponto de não haver aumento ou tiver redução no seu valor.

Tabela 5.12: Fluxo de caixa do Cenário Pessimista

| ANO   | FLUXO CX           | FLUXO CX SIMPLES   | VP               | FLUXO CX ACUM AJ   |
|-------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 0     | -R\$ 18.118.378,60 | -R\$ 18.118.378,60 |                  | -R\$ 18.118.378,60 |
| 1     | R\$ 756.344,99     | -R\$ 17.362.033,61 | R\$ 697.092,16   | -R\$ 17.421.286,44 |
| 2     | R\$ 760.126,71     | -R\$ 16.601.906,90 | R\$ 645.693,66   | -R\$ 16.775.592,79 |
| 3     | R\$ 763.927,35     | -R\$ 15.837.979,55 | R\$ 598.084,91   | -R\$ 16.177.507,88 |
| 4     | R\$ 767.746,99     | -R\$ 15.070.232,56 | R\$ 553.986,48   | -R\$ 15.623.521,40 |
| 5     | R\$ 771.585,72     | -R\$ 14.298.646,84 | R\$ 513.139,55   | -R\$ 15.110.381,85 |
| 10    | R\$ 791.069,23     | -R\$ 10.382.462,07 | R\$ 349.878,38   | -R\$ 13.059.413,39 |
| 15    | R\$ 811.044,72     | -R\$ 6.367.388,72  | R\$ 238.560,60   | -R\$ 11.660.983,82 |
| 20    | R\$ 831.524,61     | -R\$ 2.250.929,74  | R\$ 162.659,84   | -R\$ 10.707.480,48 |
| 21    | R\$ 835.682,23     | -R\$ 1.415.247,51  | R\$ 150.666,49   | -R\$ 10.556.813,99 |
| 22    | R\$ 839.860,65     | -R\$ 575.386,86    | R\$ 139.557,44   | -R\$ 10.417.256,55 |
| 23    | R\$ 844.059,95     | R\$ 268.673,08     | R\$ 129.267,49   | -R\$ 10.287.989,06 |
| 25    | R\$ 852.521,65     | R\$ 1.969.474,98   | R\$ 110.907,77   | -R\$ 10.057.345,05 |
| 30    | R\$ 874.048,89     | R\$ 6.296.450,22   | R\$ 75.621,20    | -R\$ 9.614.057,58  |
| TOTAL | R\$ 24.414.828,82  | R\$ 6.296.450,22   | R\$ 8.504.321,02 | -R\$ 9.614.057,58  |

Fonte: Elaboração própria

O fluxo de caixa quase não tem alteração e trazendo esse valor para o presente, ele perde drasticamente o valor monetário.

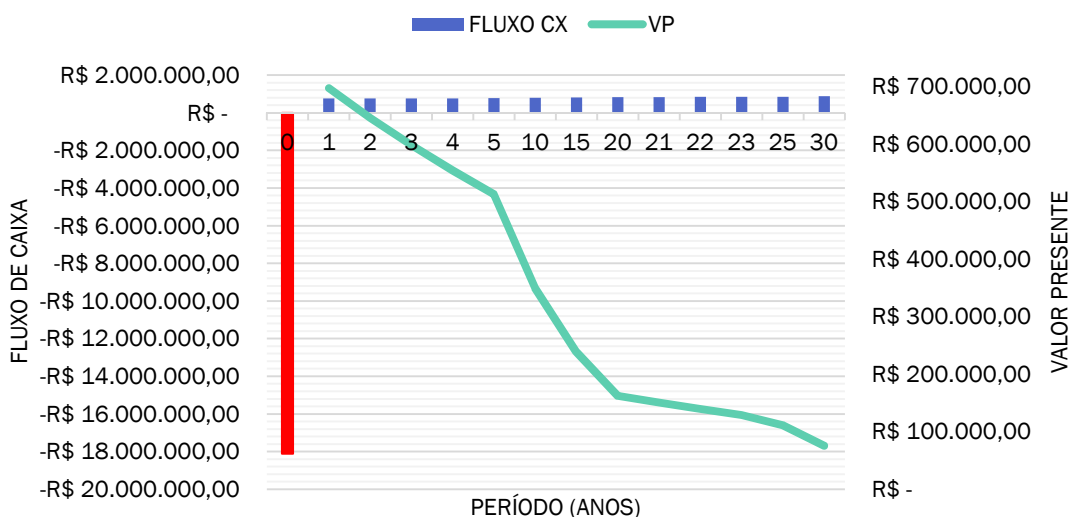


Gráfico 5.10: Fluxo de caixa x Valor Presente Líquido do Cenário Pessimista

Fonte: Elaboração própria

O fluxo de caixa ajustado mostra que ao fim dos 30 anos, a dívida sobre o equipamento continua muito alta, aproximadamente metade do valor investido.

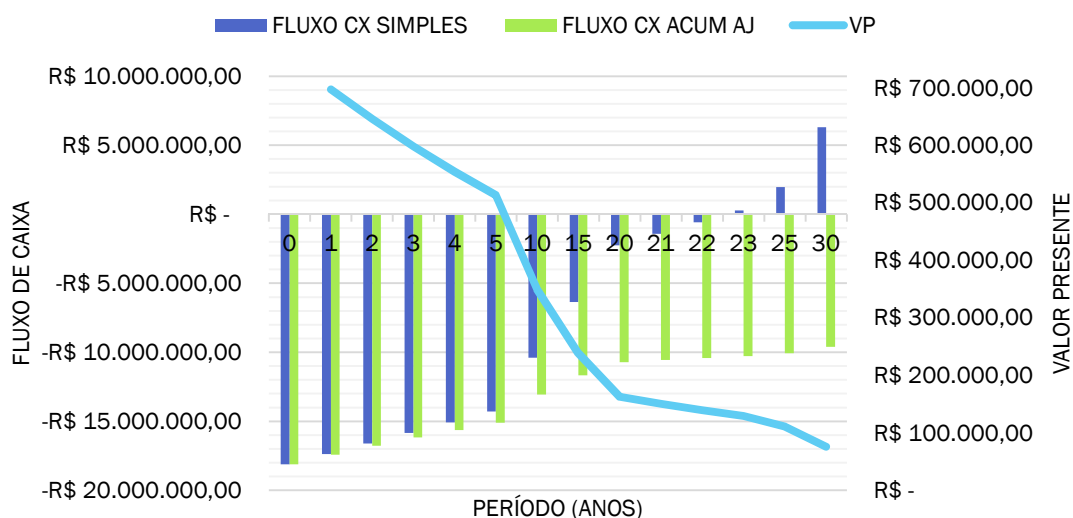


Gráfico 5.11: Fluxo de caixa Simples x Acumulado do Cenário Pessimista

Fonte: Elaboração própria

Os resultados obtidos foram:

Tabela 5.13: Resultado do Cenário Pessimista

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| <b>VPL</b>             | <b>-R\$ 10.057.345,05</b> |
| <b>TIR</b>             | <b>1,99%</b>              |
| <b>PAYBACK SIMPLES</b> | <b>22 anos e 7 meses</b>  |
| <b>PAYBACK</b>         | <b>mais de 30 anos</b>    |

Fonte: Elaboração própria

Já esse cenário nos mostra um resultado bem negativo, com um payback muito superior ao dos equipamentos, ou seja, nessas condições o projeto só traria prejuízo.

## 5.9. PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS

Tendo em vista os altos custos e a inviabilidade na instalação de aerogeradores, um novo projeto poderá ser desenvolvido, que consiste na confecção individual de um equipamento de eixo vertical híbrido adequado à localidades com incidência de ventos de baixa intensidade, com materiais de baixo custo e sem a necessidade de grandes infraestruturas para instalação.

A estrutura física da turbina pode ser desenvolvida utilizando uma compilação de informações de aerogeradores já produzidos pela indústria em alta escala e conceitos literários empregados em situações de estudos. (LETCHER, 2010)

O design poderá usar versatilidade, a fim de proporcionar uma máxima eficiência e ser aplicável a diferentes localidades. Para isso o rotor baseia-se em um misto de estruturas, Savonius, mais eficiente com ventos de baixa potência e diferentes direções e Darrieus, eficiente em ventos de média e alta potência. (LETCHER, 2010)

Um exemplo de montagem é utilizando PVC ou lâminas de alumínio para as pás, madeira para a estrutura, indutor AC baixo custo e alumínio para os eixos e polias, para ser montado em estruturas simples que podem ser uma torre metálica na área externa do imóvel ou ver instalado no telhado com uma estrutura mínima de fixação. (LETCHER, 2010)

Antes de iniciar um projeto desse, deve-se conhecer os dados de ventos e de consumo de energia e qual o tipo de cliente ele é para a concessionária, pois as taxas de cobranças são diferenciadas. No Encanto existem vários grupos de tarifa residencial, tais como: Residencial, Residencial Baixa Renda, Rural, entre outros.

Abaixo será demonstrado a diferença entre um residencial comum e um residencial de baixa renda. No domicílio que paga a conta de energia elétrica com tarifa de residencial comum, mora somente uma pessoa com a faixa etária de 70 anos. Na casa de Baixa renda mora uma família de 4 pessoas, onde reside pai, mãe e 2 filhos adolescentes.

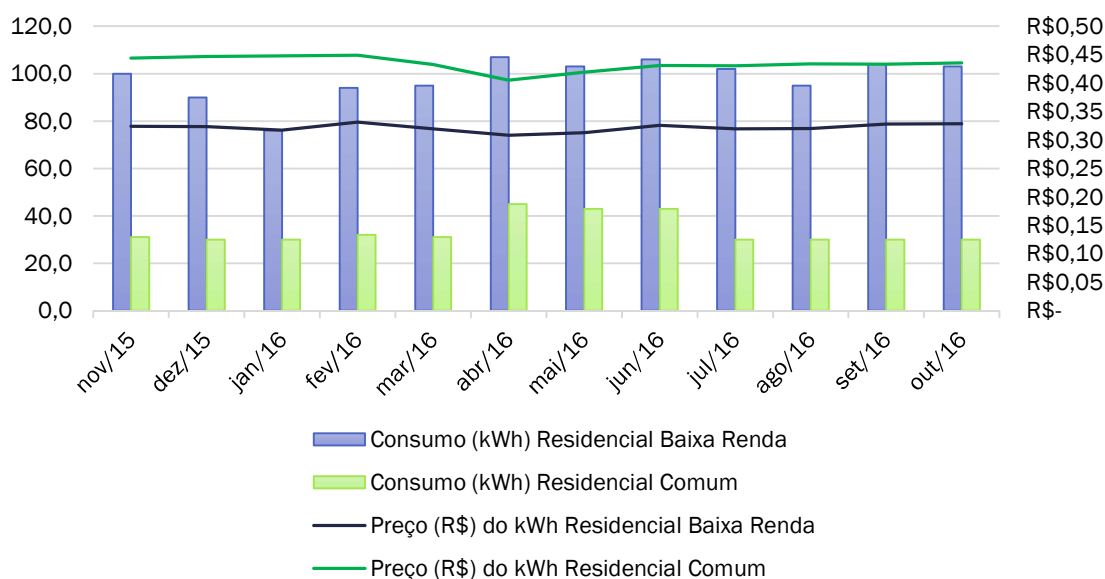


Gráfico 5.12: Comparação de Consumo e do preço do kWh entre tarifas de Residencial e Residencial de Baixa Renda

Fonte: Conta de Energia das residências; COSERN

Existe uma certa constância no Consumo do Residencial Comum, onde na outra, já se percebe uma maior oscilação, até mesmo por ter mais moradores. O cliente, mesmo consumindo menor energia, paga uma tarifa de aproximadamente 25% ao do consumidor de baixa renda.

Entende-se que o consumidor de baixa renda tem o direito a ter energia e poder pagar um preço mais acessível, mas neste caso em particular, ambas as casas são da mesma família, ambas são de uma cidade de baixa renda e a que paga uma tarifa maior é a residência da idosa.



## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho cumpriu com o seu objetivo principal de realizar um estudo de caso de microgeração de energia eólica para suprir a demanda residencial da cidade do Encanto.

A energia eólica está cada dia mais em foco, não só no Brasil, mas no mundo inteiro, além de ter um combustível que é de graça, o seu impacto ambiental é muito menor, se comparado a outras tecnologias de geração de energia. Porém, ela não pode ser utilizada em qualquer localidade, devido potência que pode ser extraída dos ventos, como é o caso do estudo abordado nessa monografia.

A cidade está localizada em um dos estados que mais contribuem com este tipo de geração, o Rio Grande do Norte, mas em contra partida, está em uma região que possui ventos muito fracos, no qual não se pode obter muita potência.

Foi utilizado no estudo, uma turbina de eixo vertical de potência nominal de 10 kW, a qual se comporta melhor nas características do local. Turbinas de eixo vertical com valores mais altos, como o escolhido, é muito menos comercializado, o mais comum é a utilização de turbinas de eixo horizontal. Mas por melhor que essa tecnologia seja, para conseguir suprir a demanda de uma pequena cidade, o custo-benefício é equiparado com a energia que já é entregue pela concessionária.

A área necessária para o parque é bem grande, 0,401 km<sup>2</sup>. Mesmo a cidade ainda ter espaço para crescer, como mostra a figura 4.13, a cidade ainda vive do plantio e estão sendo feitos projetos para construção de novos bairros, com residências sociais, para os moradores que vivem de forma mais precária. Dessa forma, será necessário um estudo, ao qual avaliará essas condições.

Para se fazer a análise de viabilidade econômica existe uma grande dificuldade de conseguir preços de equipamentos. Analisando este estudo, ao qual foi utilizado três cenários: realista, onde observa-se que o resultado obtido é praticamente “elas por elas”, ou seja, o valor do investimento e a vida útil dos equipamentos é praticamente igual a não realizar o projeto; no otimista vê-se uma oportunidade de investimento, ao qual o projeto se paga em pouco menos da metade da vida útil dos equipamentos; e o pessimista que se não houver nenhum aumento na energia ou até mesmo houver uma redução, o investidor não conseguirá quitar o investimento antes do término da vida útil dos equipamentos. Ou seja, para esta cidade em questão, o

projeto só se tornará realmente viável se o preço da energia elétrica aumentar de forma drástica.

Os preços dos aerogeradores, ainda não são muito atrativos para suprir demanda de cidades de baixa renda. O que pode ser feito para contornar essa situação, mas de modo mais caseiro, é o consumidor confeccionar o seu próprio aerogerador, como demonstrados em vários estudos. Estes projetos são feitos com materiais de fácil acesso, o que os torna economicamente mais viáveis. Lembrando que deve-se sempre prezar pela segurança da pessoa que estiver desenvolvendo esse projeto, utilizando equipamentos de proteção pessoal, principalmente quando for manusear em máquinas elétricas.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, 2016. **BIG - Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <http://www2.ANEEL.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.

Acesso em: 16 ago. 2016.

ANEEL. **Geração distribuída amplia número de conexões em 2015**. 2016. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticia.cfm?Identidade=9044&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticia.cfm?Identidade=9044&id_area=90). Acesso em: 26 out. 2016

ANEEL. **Geração Distribuída**. 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>. Acesso em: 26 out. 2016

ANEEL. **Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC)**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>. Acesso em: 01 set. 2016

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída**. 2.ed. Brasília: ANEEL, 2016

ANEEL. **Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. rev.6, 2016

ANEEL. **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. rev.7, 2016

ANEEL. **PRODIST**. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 25 out. 2016

BCB. **Dólar americano**. Banco Central do Brasil, 2016. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/batch/taxas.asp?id=txdolar>. Acesso em: 07 nov. 2016

Brasil. **Decreto nº 4.873**, de 11 de novembro de 2003. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - "LUZ PARA TODOS" e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 12 nov 2003. nº 220, Sec. 1, p.130.

Brasil. **Decreto nº 8.387**, de 30 de dezembro de 2014. Altera o Decreto nº 7.520, de 8 de julho de 2011, que institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - "LUZ PARA TODOS". Diário Oficial da União. Brasília, 31 dez 2014. nº 253, Sec. 1, p.66.

Brasil. **Lei nº 10.438**, de 26 de Abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996,

no 9.648, de 27 de maio de 1998, no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 5.655, de 20 de maio de 1971, no 5.899, de 5 de julho de 1973, no 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 26 abr 2002, Sec. 1, p. 2.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Criação do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica – ProGD. **Portaria nº538**, de 15 de dezembro de 2015. Diário Oficial da União. Brasília, 16 dez 2015. nº 240, Sec. 1, p.96.

Brasil. **Resolução Normativa nº 479**, de 03 de abril de 2012. Altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Diário Oficial da União. Brasília, 12 abr 2012. nº 71, Sec. 1, p.48-57.

Brasil. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 19 abr 2012. nº 76, Sec. 1, p.53.

Brasil. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PROD I S T. Diário Oficial da União. Brasília, 02 dez 2015. nº 230, Sec. 1, p.45-46.

CLIMATEMPO. **Previsão do Tempo**. Disponível em: <http://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/6706/encanto-rn-rn>. Acesso em: 16 ago. 2016

COSERN. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2003

COSERN. **Potencial Eólico do Estado do Rio Grande do Norte**. COSERN, 2003.

CRESESB. **História da Energia Eólica e suas utilizações**. 2015. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=tutorial\\_eolica](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_eolica). Acesso em: 15 set. 2016

Encanto, [2015?]. **História**. Disponível em: <http://www.encanto.rn.gov.br/>. Acesso em: 01 set. 2016

Groppelli, A. A.; Nikbakht, E. **Administração Financeira**. 3.ed. São Paulo: Saraiva, 1998.

Hill Country Wind Power. **Wind Basics**. Disponível em: <http://www.hillcountrywindpower.com/wind-basics.php>. Acesso em: 18 out. 2016

IBGE, 2010. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php>. Acesso em: 08 ago. 2016.

Itaú. Yamaguti, Paula; Mazuchelli, Giovani. **Relatório Estadual Rio Grande do Norte**. 2014. Disponível em: [https://www.italu.com.br/arquivosstaticos/italuBBA/contents/common/docs/RN\\_mai\\_o2014.pdf](https://www.italu.com.br/arquivosstaticos/italuBBA/contents/common/docs/RN_mai_o2014.pdf). Acesso em: 25 ago. 2016.

Letcher, T. **Small Scale Wind Turbines Optimized for Low Wind Speeds**. The Ohio State University, Columbus, OH, 2010.

Manwell, J.F.; Mcgowan, J.G.; Rogers, A.L.. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2. ed. Washington: Wiley, 2009

MME. **Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar**. 2015. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030). Acesso em: 25 out. 2016

ONS, 2016. Boletim Mensal de Geração por Estado. Disponível em: [http://www.ons.org.br/resultados\\_operacao/boletim\\_mensal\\_geracao\\_estado/index.aspx](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_mensal_geracao_estado/index.aspx). Acesso em: 01 set. 2016

ONS. **Acesso e Conexão à Rede Básica**. Disponível em: [http://www.ons.org.br/integracao\\_sin/acesso\\_conexao\\_rede.aspx](http://www.ons.org.br/integracao_sin/acesso_conexao_rede.aspx). Acesso em: 25 out. 2016

Pinto, Milton de Oliveira. **Energia Elétrica – Geração, Transmissão e Sistemas Interligados**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014, pág. 88

Pinto, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Portal do Governo do RN, 2015. **Dados Gerais do RN**. Disponível em: [http://www.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12083&ACT=&PAGE=0&P\\_ARM=&LBL=Conhe%EA+o+RN](http://www.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12083&ACT=&PAGE=0&P_ARM=&LBL=Conhe%EA+o+RN). Acesso em: 25 ago. 2016.

PORTAL ENERGIA. Construção e Montagem de Aerogerador Eixo Vertical Savonius. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/construcao-e-montagem-de-aerogerador-eixo-vertical-savonius/>. Acesso em 02 out. 2016.

Portal Metálica. **Gerador eólico vertical: vantagens e desvantagens**. 2012 Disponível em: [http://www.metalica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=1029](http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=1029). Acesso em: 21 set. 2016

Portal Planalto. **Prorrogado até 2018, Luz para Todos deve beneficiar mais um milhão de brasileiros.** 2015. Disponível em: <http://www2.planalto.gov.br/noticias/2015/05/prorrogado-ate-2018-luz-para-todos-deve-beneficiar-mais-um-milhao-de-brasileiros>. Acesso em: 8 ago. 2016

RAGHEB, M. **Vertical axis wind turbines.** 2014

Rêgo, R. B.; Paulo, G. P.; Spritzer, I. M. A.; Zotes, L. P. **Viabilidade econômico-financeira de projetos.** 3.ed. Rio de Janeiro: Editora FVG, 2010.

ROPATEC. **SA70.** Disponível em: <http://www.ropatec.it/content/SA70/42/en>. Acesso em: 26 set 2016

Tolmasquim, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016

TURBY. **Turby: The wind turbine for the built-up environment.** [2006?] Disponível em: <http://www.wind-power-program.com/Library/Turby-EN-Application-V3.0.pdf>. Acesso em 02 out. 2016.

UOL. **Atlas Geográfico do Brasil.** Disponível em: <http://biblioteca.uol.com.br/atlas/index.htm>. Acesso em: 25 ago. 2016.

Velasco, Jaime González. **Energías Renovables.** Barcelona: Reverté, 2009, pág.s 287-367

WAHL, M. **Designing an H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station.** 2007. 73 f. Tese – Uppsala Universitet, Uppsala, Suécia. 2007.

Wikipédia. **Localização de Encanto.** Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Encanto\\_\(Rio\\_Grande\\_do\\_Norte\)#/media/File:RioGrande doNorte\\_Municip\\_Encanto.svg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Encanto_(Rio_Grande_do_Norte)#/media/File:RioGrande doNorte_Municip_Encanto.svg). Acesso em: 01 set. 2016