



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ELAINE PRISCILA FONTES DA SILVA

**O CONCEITO DE SMART GRID COMO FOMENTADOR DA GERAÇÃO EÓLICA
DISTRIBUÍDA**

CARAÚBAS

2016

ELAINE PRISCILA FONTES DA SILVA

**O CONCEITO DE SMART GRID COMO FOMENTADOR DA GERAÇÃO EÓLICA
DISTRIBUÍDA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Rafael Luz Espindola

Co-orientador: Prof. Me. José Ailton L. Barboza Júnior

CARAÚBAS

2016

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586 Silva, Elaine Priscila Fontes .
c O CONCEITO DE SMART GRID COMO FOMENTADOR DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA / Elaine Priscila Fontes
Silva. - 2016.
53 f. : il.

Orientador: Rafael Luz Espindola.
Coorientador: José Aílton Leão júnior Barbosa.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2016.

1. Fontes Renováveis. 2. Energia Eólica. 3.
Geração Distribuída. 4. Smart Grid. I. Espindola,
Rafael Luz , orient. II. Barbosa, José Aílton Leão
júnior, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ELAINE PRISCILA FONTES DA SILVA

**O CONCEITO DE SMART GRID COMO FOMENTADOR DA GERAÇÃO EÓLICA
DISTRIBUÍDA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 10 / 11 / 2016.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. Rafael Luz Espíndola (UFERSA)
Presidente


Prof.^a. Dr.^a. Edna Lúcia Rocha Linhares (UFERSA)
Membro Examinador


Prof.^a. Dr.^a. Tania Luna Laura (UFERSA)
Membro Examinador


Prof. Me. José Ailton L. Barbosa Júnior (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus, pois ele sempre nos conduz ao melhor caminho e graças a ele esse sonho poderá se concretizar. Mesmo diante das dificuldades em dias difíceis, o senhor sempre esteve comigo me guiando e fortalecendo dia após dia o meu coração para suportar e seguir em frente em busca de um objetivo maior. A esta universidade e ao corpo docente que ao longo desses anos me serviu de base para obter os conhecimentos necessários para a realização desse trabalho e graças a isso oportunizaram um futuro mais promissor.

Em especial agradeço a duas pessoas que são a peça chave para essa realização, os meus pais Edival Cajé da Silva e Geisa Maria Fontes da Silva, essa conquista é toda dedicada a vocês que nunca mediram esforços para me proporcionar esse momento, sempre dedicados e empenhados a fazer o melhor por mim, para que fosse possível a consumação desse sonho que não era só meu. A minha irmã Eloisa Aline, que sempre foi minha companhia de todos os momentos, das quais levo sempre as melhores lembranças com muitas saudades da convivência diária e a meu irmão Eduardo Wagner.

Ao meu orientador Rafael Espindola, pela paciência e confiança que me foi depositada desde o momento que aceitou fazer parte desse trabalho. Ao meu querido professor Ailton, que foi mais do que meu co-orientador, é uma pessoa encantadora que eu tive a sorte de conhecer na vida. Obrigado pelos momentos de distração que já passamos juntos, mas muito mais pelo incentivo que sempre tive de sua parte, sempre serviram de muito aprendizado e sem dúvida me fizeram e fazem uma pessoa muito melhor ao seguir seus ensinamentos.

Aos meus amigos fica o agradecimento do companheirismo, do incentivo e das alegrias vivenciadas ao longo desses anos, em especial a Meise, Amanda e Valéria, pelas noites de estudos e compreensão diária. Aos Meus queridos amigos Laisy, Fernanda, Yamaguchi, Rita, Mônica, Carlos Junior, Rodrigo, Costa, Bruno e Glorinha que sempre conseguiam animar nos momentos onde o cansaço já era quase insuportável. A minha amiga Luara pela contribuição nos estudos também, e a uma pessoa muito especial na minha vida que infelizmente não pôde compartilhar desse momento, mas sem dúvidas teve uma participação significativa, Bruna Thaís (*in memoriam*).

A Deus e aos meus pais amados que tanto contribuíram para a realização desse sonho, vocês são o motivo de toda a minha motivação para vencer na vida.

RESUMO

A energia elétrica é um dos elementos básicos para o desenvolvimento econômico e social. Com o constante desenvolvimento no setor industrial mundial, houve um aumento na utilização de equipamentos elétricos, acarretando um acréscimo significativo na demanda por energia elétrica. Sabendo que esse aumento na demanda não foi seguido na mesma intensidade dos investimentos na geração de energia, as fontes renováveis surgiram como uma das possíveis alternativas para atender essa carência no setor. Atualmente, o ambiente favorável ao desenvolvimento das fontes renováveis, em particular a tecnologia eólica-elétrica, resulta de um processo amplo de conformação da indústria elétrica que vai além dos progressos técnicos e suas articulações, descreve Lopes (2012, p.323). Outro fator estimulante para novas fontes de energia alternativa é a desregulamentação das atividades do mercado de energia elétrica, que incrementa o desenvolvimento de pequenos produtores e também a competitividade entre as grandes concessionárias. O sistema de energia elétrica que provavelmente teremos no futuro terá uma grande participação da geração distribuída, onde só teremos uma maior confiabilidade desse sistema a partir do momento que fizermos uso das novas tecnologias existentes para um melhor aproveitamento do mesmo. Acompanhado de todo esse avanço na rede, temos um promissor avanço tecnológico que está dentre as propostas feitas para a implementação desse sistema, que seria as Microrredes Inteligentes, que são nada mais do que uma maneira de interligar outras formas de energia de diferentes tipos e capacidades e dessa forma conseguir inserir as energias renováveis nesse sistema. Sendo o Brasil um país privilegiado pela excelente qualidade dos níveis de ventos fortes, principalmente na costa nordestina, hoje ele representa um ponto estratégico para a entrada de novas tecnologias para a América Latina, levando em consideração também que o país possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Outro ponto importante para o aperfeiçoamento desse sistema é a *smart grid*. A expressão *Smart Grid* deve ser vista mais como um conceito e não como uma nova tecnologia ou equipamento. Consiste na utilização intensiva de tecnologia de automação, computação e comunicações para monitoração e controle da rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso, define Falção (2009).

Palavras-chave: Fontes Renováveis. Energia Eólica. Geração Distribuída. Smart Grid.

ABSTRACT

The electric power is one of the basic elements for the economic and social development. With the constant development in the worldwide sector industry there was also an increase in the using of electrics equipment resulting a significant increase in the demand of electric power. Knowing that this increase in the demand did not be following in the same intensity of the investments in the generation of power, the renewable sources arise as one of the possible alternatives to attend this lack in the sector. Currently, the enabling environment to development of the renewable sources, in particular to technology wind electric, results of a wide process of conformation of the electric industry that goes beyond of the technical progresses and its articulations, describes Lopes (2012. p.323). Another stimulating factor for new sources of alternative energy is the deregulation of the activities of the electric power marketing that increases the development of small producers and also the competitiveness between the large dealers. The electric power system that probably it will have in the future will have a large participation in the distributed generation, where just will have a larger reliability of the system from of the moment that we made use of the new technologies existing for a better use of the same. Accompanied of all this advance in the network, it have a promising technology advance that is among the proposals made for the implementation of this system, that would be the smart micro networks, that are nothing more than a way of linking others forms of energy of different types and capacities, and of this form getting to insert the renewable sources in this system. Being the Brazil a privileged country by excellent quality of the levels of strong winds, principally in the northeastern coast, today it represents a strategic point for the input of new technologies for the Latin America, leading in consideration also that the country has one of the energy matrixes cleanest of the world. Another important point for the improvement of this system is the smart grid. The expression Smart Grid should be view more like a concept and not like a new technology or equipment. Consist in the intensive use of automation technology, computation, and communications for monitoring and control of the electric network, which will allow the implementation of strategies of control and optimization of the network of form a lot more efficient that the currently in use; sets Falcão (2009).

Keywords: Renewable Sources. Wind Energy. Distributed Generation. Smart Grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da evolução da capacidade instalada	15
Figura 2 - Visão de um esquema de <i>Smart Grid</i>	16
Figura 3 - Moinhos de vento antigo.	19
Figura 4 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.	21
Figura 5 - Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A.	23
Figura 6 - Ilustração dos processos de otimização e micrositing de usinas eólicas.	25
Figura 7 - Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s.	27
Figura 8 - Velocidade média anual de vento à 50m de altura [m/s].	28
Figura 9 - Mecanismos dominantes no regime de ventos brasileiro e potiguar.	29
Figura 10 - Configuração de um sistema Microeólico Interligado à Rede Elétrica.	32
Figura 11 - Geração Distribuída em 2009.	33
Figura 12 - Número de Conexões por Fonte.	34
Figura 13 - Potência total Instalada (KW).	34
Figura 14 - Número de conexões por Estado.	35
Figura 15 - Rotor Horizontal.	35
Figura 16 - Rotor Savonius.	36
Figura 17 - Rotor Darrieus.	37
Figura 18 - Rotor H-Darrieus.	37
Figura 19 - sistema de compensação de Energia Elétrica	40
Figura 20 - Aerogerador AIR 40.	Erro! Indicador não definido.
Figura 21 - Curva de Potência do Aerogerador AIR 40.	48
Figura 22 - Distribuição de Frequência do Vento.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de energia do Aerogerador AIR 40	49
Tabela 2 - Consumo e geração para o mês de Setembro.	50

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Força de Coriolis
Ω	Velocidade angular
v	Velocidade da partícula
φ	Latitude em graus
E	Energia cinética
m	Massa de ar
P	Potência disponível no vento
μ	Fluxo de massa de ar
ρ	Massa específica do ar
A	Área da seção transversal
DP	Densidade de potência
H	Altitude do local
T	Temperatura ambiente

LISTA DE ABREVIATURAS

ABEEOLICA	Associação Brasileira de energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Aerogeradores de Pequeno Porte
CRESESB	Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito
CEPEL	Centro de Pesquisa em Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
COELCE	Companhia Elétrica do Ceará
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
GWEC	Global World Energy Council
HFC	<i>Hybrid fiber-coaxial</i>
IEDS	<i>Intelligent Electronic Devices</i> (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes)
MME	Ministério de Minas e Energia
PME	Produção Mensal de Energia
REI	Redes de Energia Inteligentes
SEE	Sistemas de Energia Elétrica
TI	Tecnologia da Informação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 HISTÓRIA	19
2.2 ENERGIA EÓLICA	20
2.2.1 O Vento	21
2.2.2 Potência do vento.....	22
2.3 POTENCIAL EÓLICA	24
2.3.1 Potencial Eólico no Brasil	26
2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	29
2.4.1 Impactos sobre a Matriz Energética	30
2.4.2 Sistema de Micro e Minigeração Distribuída	31
2.4.3 Bons motivos para instalar um Microgerador.....	31
2.4.4 Sistema de Microgeração Eólica	32
2.4.4 Tipos de Minigeradores Eólicos e suas Especificidades	35
2.4.5 Vantagens, Desvantagens e viabilidade de um projeto com Microgerador Eólico	38
2.4.6 Sistema de Compensação de Energia Elétrica	39
2.5 CONCEITO <i>SMART GRID</i>	40
2.5.1 Caracterização de uma <i>Smart Grid</i>	41
2.5.2 Tornando a <i>Smart Grid</i> uma realidade	42
2.5.3 Tecnologias viabilizadoras.....	42
2.5.4 Benefícios de uma Rede Inteligente	43
2.5.5 Cenário Atual	44

3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	46
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

Em se tratando de produção e consumo de energia, tem-se um fato ambientalmente impactante. A energia elétrica é um dos elementos básicos para o desenvolvimento econômico e social. No entanto, segundo Aldabó (2014) trinta e cinco por cento da população mundial não tem qualquer acesso à eletricidade. Vivemos em constante desenvolvimento no setor industrial mundial, ocorrendo assim um aumento na utilização de equipamentos elétricos que são utilizados em diversas atividades humanas, o que acarretou um acréscimo significativo na demanda por energia elétrica nas últimas décadas. Este aumento na demanda não foi seguido na mesma intensidade por investimentos na geração de energia para suprir essa carência no setor, o que pode ter vindo a provocar alguns problemas energéticos em alguns países.

As fontes de energia renováveis surgem como uma das possíveis soluções que buscam atender essa carência de geração que ocorre graças ao rápido crescimento do consumo mundial. Os padrões atuais que utilizamos estão sendo modificados à medida que ocorrem incentivos ao uso mais eficiente da energia, principalmente ocorrendo uma transição de fontes de energia fósseis para fontes renováveis. Diante da preocupação acerca da emissão de gases e do aumento tanto dos preços como do consumo dos combustíveis fósseis, surgiu a necessidade de se procurar fontes energéticas renováveis, como a solar, eólica, biomassa, entre outras que pudessem auxiliar a suprir a crescente demanda energética.

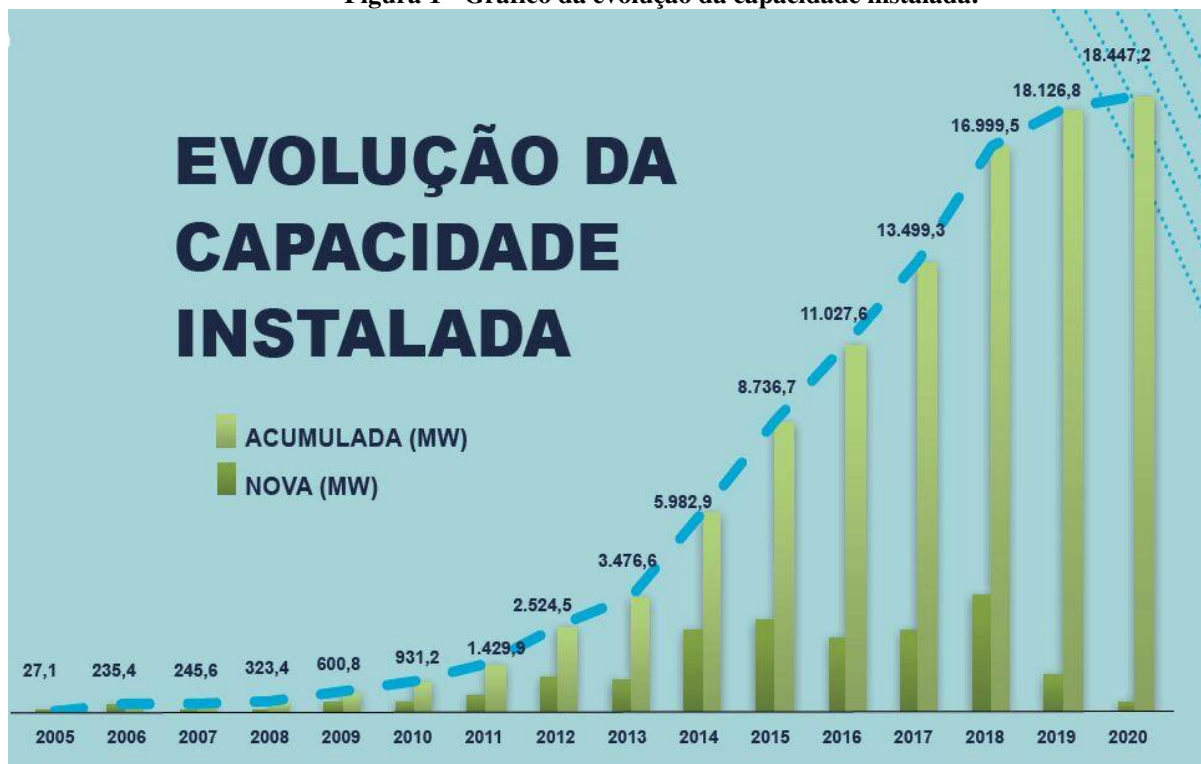
De acordo com Lopes (2012, p.167), no Brasil, os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para medição do potencial eólico foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha-PE, no início dos anos 1990. Atualmente o ambiente favorável ao desenvolvimento das fontes renováveis, em particular a tecnologia eólica-elétrica, resulta de um processo amplo de conformação da indústria elétrica que vai além dos progressos técnicos e suas articulações, descreve Lopes (2012, p.323):

“Outro fator estimulante para novas fontes de energia alternativa é a desregulamentação das atividades do mercado de energia elétrica, que incrementa o desenvolvimento de pequenos produtores e também a competitividade entre as grandes concessionárias”.

De acordo com o GWEC – Global World Energy Council (2015), o Brasil se encontra em uma colocação privilegiada, com uma evolução considerável na capacidade instalada como também com o que já está contratado para ser instalado até 2020, ocupando hoje o

oitavo lugar em geração, representando cerca de 3% de toda a produção eólica mundial, ficando atrás apenas da China, Estados Unidos e Alemanha, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Gráfico da evolução da capacidade instalada.



Fonte: GWEC, 2015.

O sistema de energia elétrica que provavelmente teremos no futuro terá uma grande participação da geração distribuída, onde só teremos uma maior confiabilidade desse sistema a partir do momento que fizermos uso das novas tecnologias existentes para um melhor aproveitamento do mesmo. No Brasil este mercado ainda está incipiente, mas ele vem ganhando importância, especialmente em países desenvolvidos, onde foi enxergado nessa nova modalidade de geração os diversos impactos positivos que estão associados a toda cadeia produtiva que envolve a geração distribuída, que vão desde os crescentes investimentos em fontes de energia renováveis que contribuem para o desenvolvimento da cadeia produtiva, até a redução dos custos associados a essas tecnologias tornando-as mais acessíveis aos consumidores finais. Nesse contexto a *Smart Grid* ou Redes de Energia Inteligentes (REI), nasce como alternativa para essa nova tendência.

No momento, as REI significam uma grande evolução no setor das redes elétricas, tendo em vista que elas representam um aumento da eficiência e da qualidade de

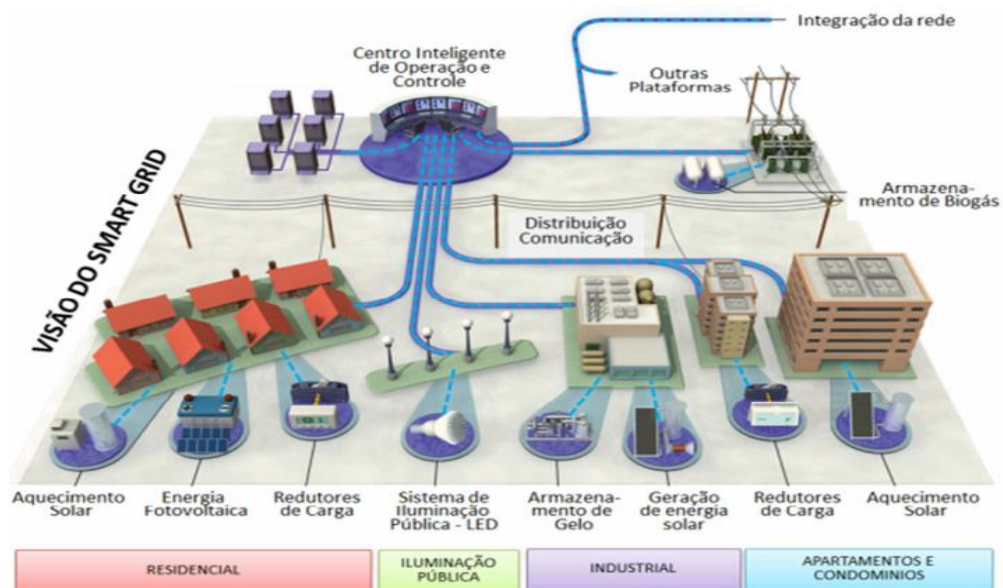
fornecimento, assim como também maximiza a utilização do sistema elétrico de transmissão e distribuição, estimulando o consumo racional da energia elétrica, visando também a redução dos custos, tendo todo um respeito ao meio ambiente e integração de recursos distribuídos.

Nesse estudo será apresentado o conceito de energia eólica mostrando as vantagens e desvantagens dessa fonte renovável, enfatizando as regiões mais privilegiadas com o vento onde se pode conseguir um melhor aproveitamento dessa energia limpa, assim como também conceituando o que seria a *Smart Grid*, como ela está sendo utilizada atualmente e como ela se encaixa na geração distribuída evidenciando a importância das redes inteligentes para o novo modelo de consumo e distribuição de energia elétrica utilizando como fonte geradora a energia eólica.

1.1 Justificativa

Está evidente que a *Smart Grid* chegou como uma solução para os consumidores e produtores de energia, de tal forma que ela possibilita uma integração de todo o sistema elétrico que vai desde a geração, transmissão, distribuição e consumo em residências, sendo possível maximizar a utilização do sistema de transmissão e distribuição e ao mesmo tempo acompanhar e controlar toda a capacidade do sistema, ainda havendo um estímulo para que haja racionamento do consumo, tendo em vista que seja possível fazer esse acompanhamento em tempo real reduzindo assim as perdas de energias existentes (Figura 2).

Figura 2 - Visão de um esquema de *Smart Grid*.



Fonte: Conceição (2013).

Mesmo com tantos benefícios, ainda assim, há algumas dificuldades para se implantar um sistema desse tipo. O sistema tenderá a ficar totalmente automatizado para aproveitamento de todos os recursos que ele nos oferece. Para que isso seja possível é necessário que haja uma confluência de diferentes indústrias para se obter o fornecimento de tecnologia que vai ser utilizada. Assim, alguns incrementos serão necessários para que haja essa mudança da rede convencional de energia para a *Smart Grid*, onde será feito uso de tecnologias de automação, computação e comunicações que serão introduzidas em partes da rede.

Acompanhado de todo esse avanço na rede, temos um promissor avanço tecnológico que está dentre as propostas feitas para a implementação desse sistema, que seriam as Microrredes Inteligentes, que são nada mais do que uma maneira de interligar outras formas de energia de diferentes tipos e capacidades e dessa forma conseguir inserir as energias renováveis nesse sistema.

Sendo o Brasil um país privilegiado pela excelente qualidade dos níveis de radiação solar e dos ventos fortes, principalmente na costa nordestina, hoje ele representa um ponto estratégico para a entrada de novas tecnologias para a América Latina, levando em consideração também que o país possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo.

Diante da facilidade que se tem em conseguir gerar energia através dessa fonte de energia limpa no país, ela torna-se de grande importância para ser incrementada à *Smart Grid* de maneira que resulte em uma distribuição de energia muito mais consciente em relação ao meio ambiente e de excelente qualidade analisando o potencial elétrico que se pode gerar com ela.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar a importância de um sistema *Smart Grid* acoplado a energia eólica como forma de viabilizar o sistema elétrico para que se tenha um melhor aproveitamento da energia diminuindo as perdas da mesma, assim como também para facilitar a vida dos consumidores reduzindo os custos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demonstração de quais áreas são mais propícias para melhor aproveitamento dessa fonte eólica;
- Como introduzir a energia eólica à *Smart Grid* através da Geração Distribuída;
- Custos para se implantar um sistema desse porte;
- Vantagens e desvantagens de se ter um sistema *Smart Grid*;
- Simulação da implementação do sistema em uma residência na cidade de Caraúbas-RN.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRIA

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 a.C. (Lopes, 2012 p.26). Esse tipo de moinho se espalhou pelo mundo, sendo utilizado ainda por muitos séculos. Eles foram bastante importantes na utilização de necessidades básicas como o bombeamento d'água ou moagem de grãos, mesmo tendo baixa eficiência pelas suas características.

“Na Europa, os primeiros surgiram no século 12 na França e Inglaterra” (LOPES, 2012, p.26), e possuíam características comuns a todos. Na parte superior, um eixo horizontal que suportava de quatro a oito vigas de madeira com comprimento de 3m à 9m (Figura 3) e as vigas eram cobertas com telas ou pranchas de madeira, (Lopes, 2012, p.26).

Figura 3 - Moinhos de vento antigo.



Fonte: Lopes (2012)

De acordo com Lopes (2012, p.28) “a aplicação de turbinas eólicas para geração de eletricidade iniciou na Dinamarca ao final do século passado”. Nesse mesmo período, com o avanço da rede elétrica, iniciaram-se várias pesquisas visando o aproveitamento da energia eólica para grandes blocos de energia, mas foi através de Charles Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, que se ergueu o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica, por volta de 1888 na cidade de Cleveland, Ohio. O mesmo foi construído

para gerar uma potência de 12 KW em corrente contínua. Ele era utilizado para carregar baterias, as quais eram destinadas para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes.

Esse feito de Bruch foi de grande importância para o desenvolvimento de energia eólica como fonte de eletricidade, tendo três pontos fortes. Primeiro que a altura que ele utilizou para a invenção estava dentro das mesmas utilizadas nos moinhos que serviram para o beneficiamento de grãos. Segundo que ele conseguiu introduzir um mecanismo indispensável que servia para multiplicar a rotação das pás (50:1), onde funcionava em dois estágios principais possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo (máquina que transforma a energia mecânica em elétrica). Para finalizar, essa invenção foi a mais ambiciosa tentativa na época de combinar a aerodinâmica e a estrutura que eram usadas nos moinhos de vento com as inovações tecnológicas que existiam naquele tempo na produção de energia elétrica.

Houve muitas tentativas de construção de aerogeradores de grande porte, mas todos foram destruídos depois de um período pelas fortes tormentas. Anos depois esses problemas estruturais foram reparados e hoje já existem aerogeradores de diâmetros muito grandes e com capacidades bem elevadas. De certa forma a Segunda Guerra Mundial também contribuiu para que se chegasse a esse avanço, levando em consideração que no período do seu ocorrido os países se empenharam no sentido de economizar combustíveis fósseis, então houve um interesse para que se conseguisse os aerogeradores desde esse período. Só após a Segunda Guerra Mundial foi que os combustíveis fósseis e as usinas hidroelétricas ganharam forças novamente e se tornaram economicamente competitivas e os próximos aerogeradores que foram construídos passaram a ser utilizados apenas para pesquisas a fim de aprimorar com técnicas aeronáuticas na operação e desenvolvimento das pás, assim como também no sistema de geração. Com isso, outros países também mostraram interesses em pesquisas nessa área, como a França e Alemanha que desenvolveram e operaram um gerador com o maior número de inovações tecnológicas na época.

2.2 ENERGIA EÓLICA

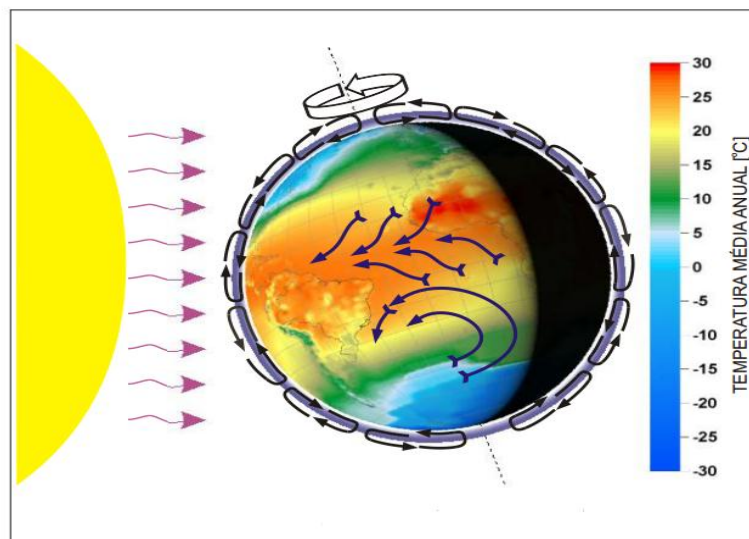
Para trabalhar com energia eólica não basta apenas conhecer o funcionamento de uma turbina, precisa-se de conhecimentos específicos para estimar os recursos do vento em determinadas regiões e como aproveitar a energia que contem no vento transformando-a assim em energia elétrica a partir da energia eólica

2.2.1 O Vento

“O combustível do sistema de energia eólica é o vento, movimento do ar na atmosfera terrestre” (Lopes, 2012, p.23). A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Esse movimento do ar na atmosfera é gerado principalmente nas regiões próximas a linha do equador e pelo resfriamento nas regiões próximas aos polos. Dessa forma o ar frio que circula nos polos se movem em direção ao equador para substituir o ar quente tropical, que por sua vez, também se desloca para os polos. Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

As regiões tropicais são as mais beneficiadas, pois recebem os raios solares quase que perpendiculares tornando assim mais aquecidas do que as regiões polares. Dessa forma o ar quente que se encontra nas regiões tropicais tende a subir das baixas altitudes sendo substituído pelas massas de ar frio que chegam das regiões polares, onde o deslocamento dessas massas forma o vento como se observa na Figura 4.

Figura 4 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESESB (2003).

Destacam-se os aquecimentos desiguais da superfície terrestre, onde demonstram os mecanismos atuantes na formação dos ventos, que ocorrem tanto em escala global (diferentes latitudes) quanto local (mar-terra, montanha-vale). Uma massa que se desloca no sentido do

equador ao polo, ou vice-versa, terá seu movimento angular alterado. De acordo com a lei da conservação, quando uma massa varia em uma direção e é alterada, também irá variar em outra direção no sentido oposto adquirindo uma quantidade de movimento transversal ao seu deslocamento.

Segundo Lopes (2012, p.32) a força de Coriolis, por unidade de massa na Equação 1, é dada por:

$$C = 2\omega v \sin\varphi \quad (1)$$

onde:

$\omega \rightarrow$ velocidade angular da Terra ($7,29 \cdot 10^{-5}$ rad/s);

$v \rightarrow$ velocidade da partícula em m/s;

$\varphi \rightarrow$ latitude em graus.

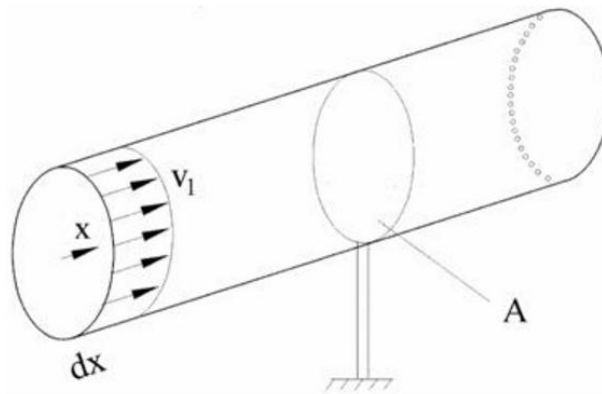
O efeito que a força Coriolis tem sobre o vento é tentar fazer com que este apresente movimentos tipicamente circulares, ou em espiras, em torno dos centros de pressão que tendem a provocar deslocamentos de massa de ar entre o equador e os polos.

2.2.2 Potência do vento

O conhecimento da velocidade média do vento é indispensável na hora de fazer uma possível estimativa de quanto de energia eólica pode ser produzida por um aerogerador. Eles têm uma capacidade mínima e uma máxima de até onde podem gerar. Só começam a gerar numa determinada velocidade do vento e param de gerar quando o vento ultrapassa determinado valor de segurança. A partir da determinação da velocidade média do vento é que se pode estipular qual será o dimensionamento do sistema de armazenamento. Para se obter esse resultado, deve-se calcular a potência que o vento gera.

Considerando-se um fluxo de ar que se move a uma velocidade v , perpendicular à seção transversal de um cilindro imaginário, Figura 5.

Figura 5 - Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A.



Fonte: CRESESB (2003).

A energia cinética de uma massa de ar **m** em movimento a uma velocidade **v** é dada pela Equação 2.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

onde:

E = energia cinética [J];

m = massa de ar [kg];

v = velocidade da massa de ar em movimento (vento) [m/s].

A potência **P** dissipada no vento é definida como a derivada da energia no tempo (Equação 3).

$$P = \frac{\mu v^2}{2} \quad (3)$$

onde:

P = potência disponível no vento [W];

μ = fluxo de massa de ar [kg/s];

v = velocidade da massa de ar em movimento (vento) [m/s].

Substituindo **μ** na Equação 3:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (4)$$

onde:

P = potência disponível no vento [W];

ρ = massa específica do ar [g/m³];

v = velocidade do vento [m/s];

A = área da seção transversal [m²].

A Equação 4 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência **DP**, ou fluxo de potência conforme a Equação 5.

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. Sabendo que a altitude do local também afeta a temperatura ambiente e a pressão atmosférica, a massa específica do ar é dependente de ambas. Uma estimativa da massa específica do ar, ou densidade, em função da altitude do local e da temperatura ambiente pode ser expressa na Equação 6:

$$\rho = \frac{353,4(1 - \frac{H}{45271})^{5,2624}}{273,15 + T} \quad (6)$$

onde:

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

H = altitude do local [m];

T = temperatura ambiente [°C].

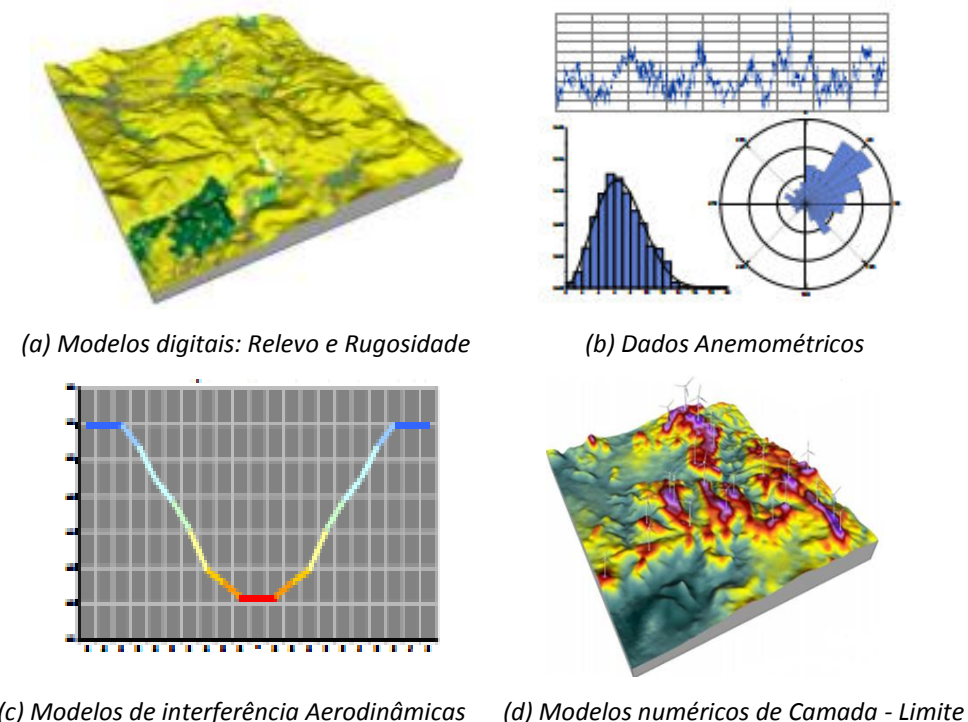
2.3 POTENCIAL EÓLICA

Sabendo que a produção de energia é dependente da velocidade dos ventos, é de extrema importância que haja uma avaliação de viabilidade técnica e econômica de

empreendimentos eólicos, onde requer um resultado confiável de que se consiga gerar energia no parque eólico. No entanto para obter esse resultado é necessário que se tenha uma rede anemométrica qualificada para a determinação do recurso eólico em uma determinada região. É necessário o uso de equipamentos de alta confiabilidade, com torres de medições altas, entre 50 a 70 metros que tenham uma certa durabilidade já que o equipamento deve permanecer no local por um período mínimo de um ano, com anemômetros previamente calibrados em túnel de vento e um sistema eficiente de coletas de dados para as verificações de falhas.

Essas medições devem seguir por todo o período de funcionamento do parque, possibilitando o acompanhamento contínuo do desempenho das turbinas e melhorando possíveis estimativas que possam ser implementadas no longo prazo. Na maioria dos casos, os cálculos da produção energética e a localização das turbinas (*micrositing*) que são feitos dentro de um parque, levam em considerações vários aspectos como: a curva de potência certificada por órgãos firmados independentes, a influência da temperatura, altitude e densidade do ar e avaliação das perdas energéticas por interferência aerodinâmica entre rotores. Todo o processo de otimização busca a maximização da energia gerada e o aproveitamento dos fatores condicionantes do terreno e infraestrutura. Na Figura 6 é mostrado como funciona o processo de otimização.

Figura 6 - Ilustração dos processos de otimização e micrositing de usinas eólicas.



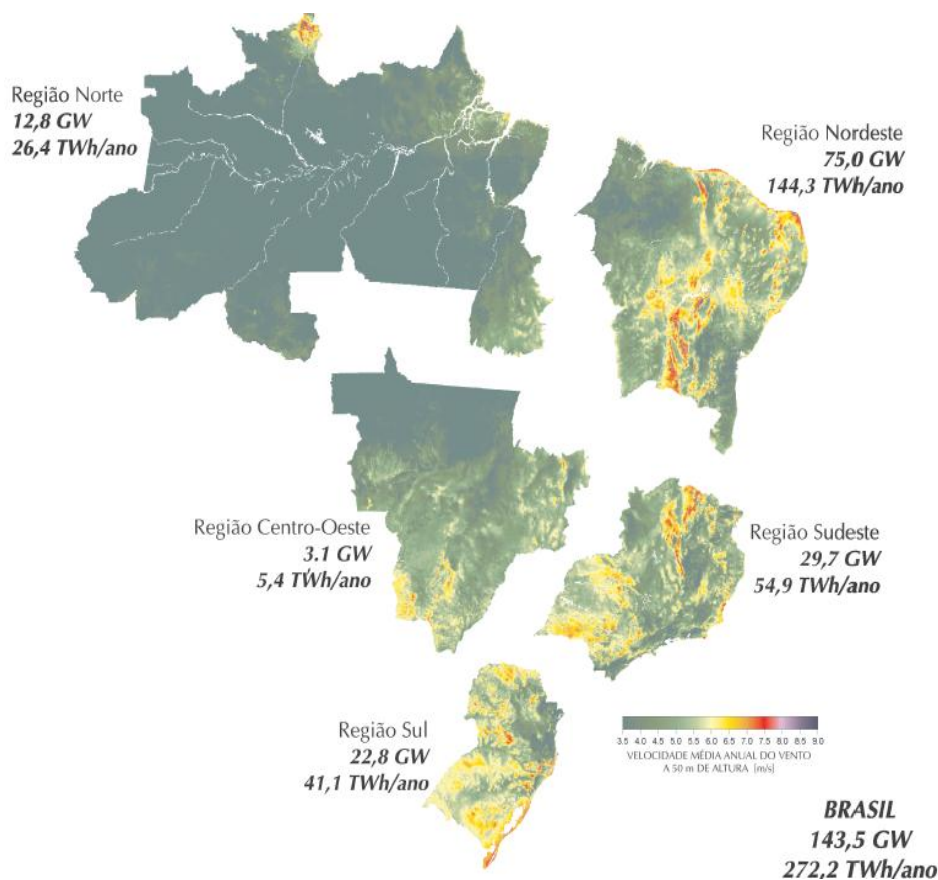
Fonte: CRESESB (2003).

No Brasil, os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores para a medição do potencial eólico foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha – PE, no início dos anos 90, (Alves, 2009). Estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 5000.000 TWh/ano, o que significa mais de 30 vezes o atual consumo mundial de eletricidade, Alves (2009).

2.3.1 Potencial Eólico no Brasil

Segundo um estudo realizado pelo Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel), o potencial eólico do Brasil era de **143, 5 GW** (Figura 6). O estudo que foi realizado levou em conta geradores de energia eólica de até 50 metros. Depois com os avanços tecnológicos no setor, que permitem geradores de até 80 metros de altura, o potencial aumentaria em uma escala de mais ou menos 50%. Quanto mais alto, mais potencial eólico, já que vão diminuindo os problemas com relevo e rugosidade do solo.

Figura 7 - Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s.

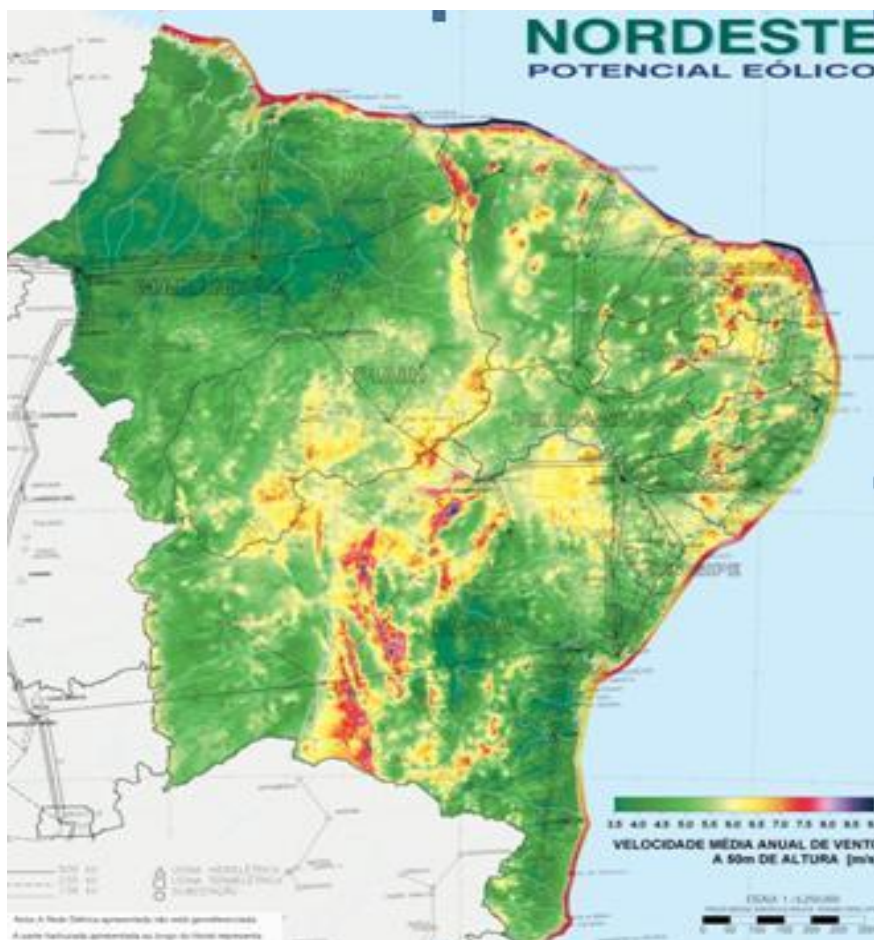


Fonte: Cepel (2005).

Hoje, o Brasil conta com 9,81GW de capacidade instalada. O potencial eólico do Brasil é de mais de três vezes o necessário para a energia do país, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica (2016). Atualmente o Brasil conta com 392 usinas que usam a força do vento, tendo destaque para os quatro estados que foram os maiores geradores no ano de 2015: Rio Grande do Norte (7,18 TWh), Ceará (4,62 TWh), Bahia (4,01 TWh) e Rio Grande do Sul (3,33TWh). No Brasil, as regiões Nordeste e Norte são considerados as áreas com os melhores potenciais para aplicações em energia eólica, já que apresentam várias vantagens importantes na opção pelo investimento em geração de energia eólico-elétrica. Tal fato é observado pelos mapeamento eólico de ambas as regiões que são feitas, principalmente na costa litorânea, onde se observam fortes e constantes ventos praticamente durante todo o ano.

Dados da ABEEólica mostram que, de acordo com uma pesquisa realizada pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) e pela Companhia Elétrica do Ceará (COELCE), a costa nordestina, entre o Rio Grande do Norte e o Ceará, (Figura 8), apresenta um recurso eólico estimado na ordem de 12.000 MW (CHESF – COELCE, 1996).

Figura 8 - Velocidade média anual de vento à 50m de altura [m/s].



Fonte: Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB (2008).

O estado do Rio Grande do Norte é um dos maiores produtores pois tem sua localização privilegiada para o uso desse recurso. O Estado está localizado na zona de predomínio dos ventos alísios (FIGURA 9), resultando em ventos com grande constância. O litoral possui uma extensão na faixa de 400 km apresentando uma grande área com dunas e formação arenosas, orientadas segundo a direção dos ventos alísios, intensos e constantes nesta região da costa brasileira. Dessa forma as regiões com ventos médios anuais mais intensos no Estado, situam-se ao longo dos litorais norte e nordeste, nas áreas elevadas a nordeste do Estado, e nos elevados das Serras Centrais. Ao longo do litoral, as brisas marítimas e terrestres criam um ciclo diurno característicos, de modo geral, os ventos mais intensos ocorrem no período que se estende do final da manhã ao meio da tarde. Já nas regiões serranas, ao longo da influência oceânica, o vento tende a apresentar maiores intensidades durante a noite e início da madrugada, e também no início da manhã.

Figura 9 - Mecanismos dominantes no regime de ventos brasileiro e potiguar.



Fonte: Atlas Eólico do RN.

2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída é caracterizada pela instalação de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis ou mesmo utilizando combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica. De maneira geral, a presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, dentre os quais se destacam os investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada e a diversificação da matriz energética. De maneira geral, observa-se que a Geração Distribuída tem potencial para aumentar a participação das fontes renováveis na matriz elétrica, tanto ao produzir mais energia deste tipo, quanto ao reduzir a demanda por fontes não renováveis devido ao melhor manejo dos reservatórios.

Além do impacto na matriz elétrica, a Geração Distribuída, em larga escala, contribui com mais alguns benefícios ao sistema elétrico:

- I. Possibilidade de redução das perdas técnicas, pois a Geração Distribuída tende a reduzir o carregamento das Linhas de Transmissão e Distribuição em alguns casos - a necessidade de investimentos na ampliação destes sistemas, consequentemente, tende a diminuir;
- II. Postergação de investimento em Centrais Elétricas Convencionais, visto que parte da demanda tende a ser atendida pela Geração Distribuída;
- III. A inserção de novas fontes na matriz energética aumenta a segurança energética do sistema e diminui o risco de racionamento.

Por outro lado, apresentam algumas desvantagens no aumento da inserção de pequenos geradores associados à rede de distribuição, tais como: o aumento da complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico, a eventual incidência de tributos e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes.

A Geração Distribuída vem ganhando importância no mercado de energia, com destaque para os países desenvolvidos, entretanto, no Brasil esse mercado ainda está iniciando, tendo em vista que, essa forma de gerar energia está ligada a diversos impactos positivos que envolve toda a cadeia produtiva, como já foi citado, principalmente na questão de investimentos em geração utilizando fontes renováveis que contribuem para que haja uma redução dos custos que estão associados a estas tecnologias, onde as tornam mais acessíveis aos consumidores finais.

2.4.1 Impactos sobre a Matriz Energética

A inclusão da Geração Distribuída no sistema elétrico modifica a curva de carga acatada pelas grandes centrais de geração, bem como favorece a adoção de fontes renováveis, em especial a fotovoltaica e a eólica.

De acordo com o relatório publicado pelo Ministério de Minas e Energia – MME (2010), podem ser citados os seguintes impactos:

I. O custo de instalação de fontes renováveis é competitivo com o custo de pequenos geradores a combustíveis fósseis. A logística de operação, mais simples por não necessitar de insumos (combustível), também favorece a adoção de fontes renováveis, em especial a solar fotovoltaica e eólica.

II. Ao atender as cargas no próprio ponto de consumo, a Geração Distribuída modifica a curva de carga a ser atendida pelas grandes centrais, reduzindo a demanda média atendida por essas unidades. Em larga escala, essa característica permite um melhor manejo dos reservatórios das hidrelétricas, o que possibilita reduzir a participação das fontes termelétricas.

2.4.2 Sistema de Micro e Minigeração Distribuída

Conforme já foi mencionado, a Geração distribuída consiste na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis para gerar eletricidade onde são conectadas à rede de distribuição.

A Microgeração Distribuída é caracterizada por uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 KW e que utilize cogeração qualificada, conforme é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Já a Minigeração Distribuída é uma 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 que são conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

2.4.3 Bons motivos para instalar um Microgerador

O custo da eletricidade tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, enquanto os valores referentes as instalações que envolvam fontes renováveis vêm caindo, levando em consideração a grande procura por fontes mais limpas e pelas iniciativas referentes a produção de novas tecnologias locais para a fabricação desses componentes para suprir a demanda que só tende a aumentar. Com o sistema eólico não está sendo diferente, as instalações de pequeno porte de sistemas eólicos estão aumentando anualmente. Com a regulamentação da ANEEL,

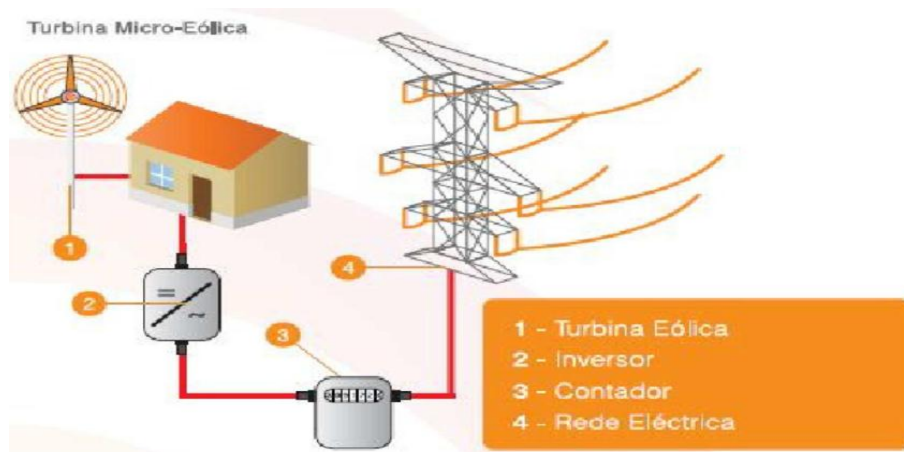
onde permite a injeção de energia na rede em troca de créditos em KWh na conta de luz, a geração descentralizada de energia tornou-se viável economicamente para consumidores residências de quase todo o Brasil.

Esse tem se tornado um investimento cada vez mais viável, uma vez que após recuperar o investimento que foi feito, suas economias irão ser significativas ao longo prazo. Lembrando que um sistema eólico tem vida útil de aproximadamente uns 20 anos, dependendo do uso correto e manutenção adequada, sua conta de luz ainda poderá ser reduzida para o valor mínimo (custo de disponibilidade). Além de todos esses benefícios ainda estará contribuindo para a redução do impacto ambiental, ao consumir energia gerada por seu próprio aerogerador estará eliminando as perdas ocorridas na transmissão e distribuição de energia, já que quando a energia gerada não está sendo consumida, automaticamente ela é injetada na rede de distribuição e é utilizada por outros usuários da mesma rede. Outra vantagem será a valorização do imóvel, pois essa é uma tecnologia bastante inovadora no Brasil.

2.4.4 Sistema de Microgeração Eólica

Segundo Pereira *et al.* (2015), um dos motivadores para o reconhecimento do potencial de mercado de Aerogeradores de Pequeno Porte (APP), é graças as recentes transformações no setor de geração distribuída (Figura 10), promovida pela resolução ANEEL n° 882/2012. Ao classificar a fonte eólica como uma opção de geração descentralizada, a resolução representa o primeiro passo para a criação de um ambiente favorável para a consolidação de um mercado específico para APP.

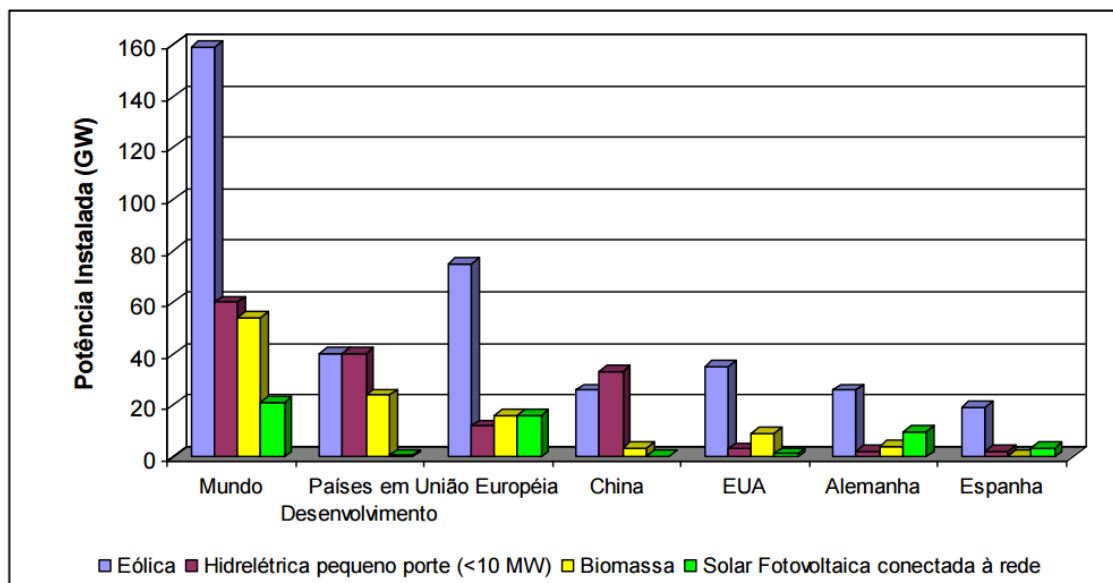
Figura 10 - Configuração de um sistema Microeólico Interligado à Rede Elétrica.



Fonte: Conceição (2013).

Através dos registros de projetos participantes da ANEEL é possível notar uma grande diferença do número de projetos e potências instalados das fontes solar fotovoltaica e eólica. A Figura 11 apresenta a capacidade instalada existente em 2009 das fontes eólica, biomassa, solar e hídrica de pequeno porte (< 10MW), assim como o total estimado no mundo.

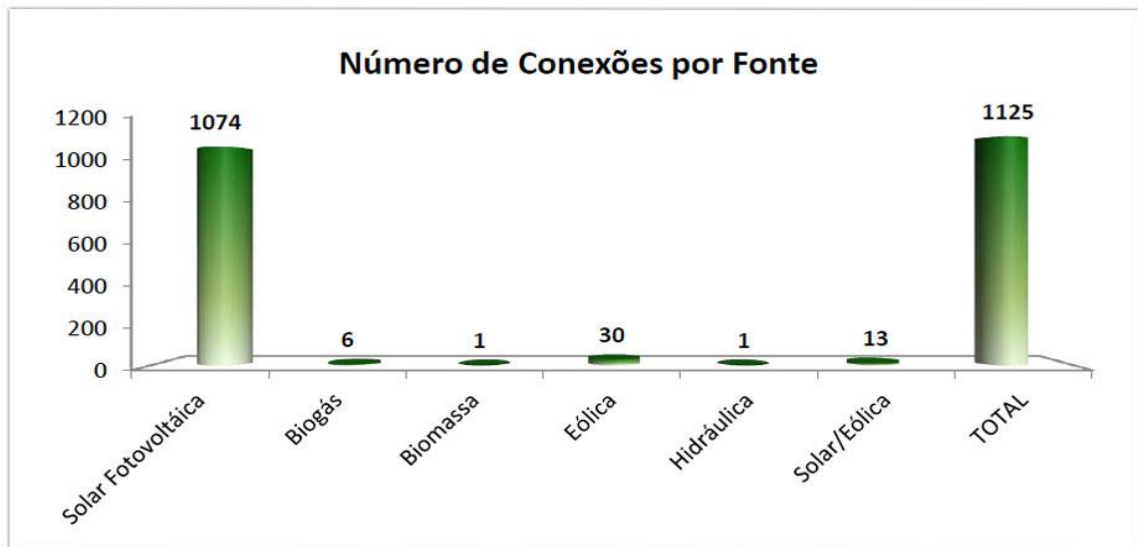
Figura 11 - Geração Distribuída em 2009.



Fonte: MME (2010).

O Brasil ainda estava incipiente na Geração Distribuída nessa época, mas desde então a energia eólica já mostrava força no mercado consumidor. Atualmente, segundo a ANEEL (2015), o Brasil já conta com mais de 1000 adesões de consumidores, mais precisamente 1125 conexões, que representam potência instalada de 13,1 Megawatts (MW) Figura 12.

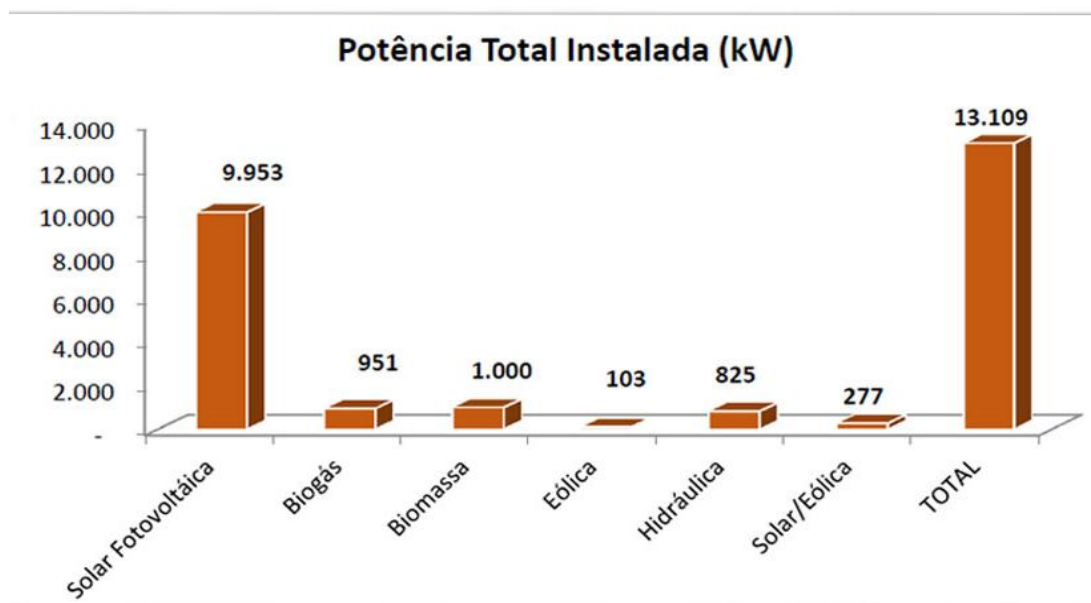
Figura 12 - Número de Conexões por Fonte.



Fonte: ANEEL (2015).

A fonte mais usada entre os consumidores é a solar com 1074 adesões, seguida pela eólica com 30 instalações. Abaixo na Figura 13, podemos observar o gráfico de potência referente a cada fonte.

Figura 13 - Potência total Instalada (KW).

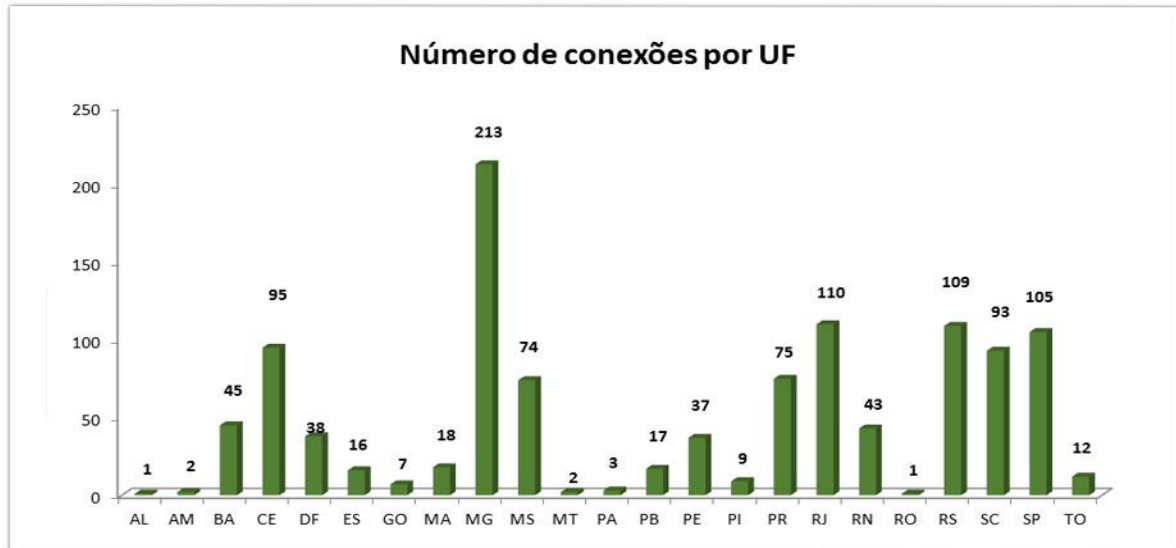


Fontes: ANEEL (2015).

Atualmente, o estado que concentra o maior número de micro e minigeração é o de Minas Gerais com 213 conexões, seguida de Rio de Janeiro com 110 e Rio Grande do Sul

com 109. O estado do Rio Grande do Norte como grande promissor para essa geração, aparece em décimo lugar com 43 instalações, Figura 14.

Figura 14 - Número de conexões por Estado.



Fonte: ANEEL (2015).

2.4.4 Tipos de Minigeradores Eólicos e suas Especificidades

ROTOR HORIZONTAL: Aerogerador com o rotor em eixo horizontal que possui três ou mais pás (Figura 15).

Figura 15 - Rotor Horizontal.



Características:

- O mais eficiente entre todos os tipos de microgeradores eólicos quando opera em condições de vento sem muitas mudanças de direção;
- Sem sistema de controle das pás ou eixo interno, pode ser mais ruidoso que outros tipo;
- Inadequado para locais com ventos turbulentos.

ROTOR SAVONIUS: Aerogerador com o rotor em eixo vertical que possui duas pás onduladas, em formato de “S” (Figura 16).

Figura 16 - Rotor Savonius.

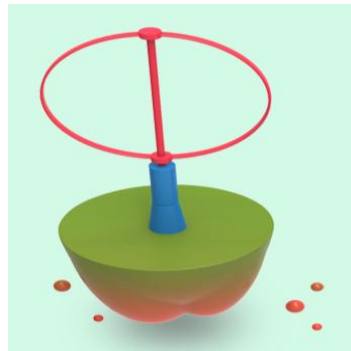


Características:

- Começa a gerar energia com pouco vento;
- Suporta melhor ventos mais turbulentos;
- É muito silencioso – quase inaudível;
- Este tipo, contudo, possui uma potência baixa.

ROTOR DARRIEUS: Aerogerador com rotor em eixo vertical e pás arqueadas (Figura 17).

Figura 17 - Rotor Darrieus.



Características:

- Disponível em níveis de potência maiores;
- Aplicável em áreas urbanas;
- Muitos modelos são ruidosos;
- Normalmente precisa de sistema de aceleração inicial;
- Geralmente é mais caro do que os outros tipos.

ROTOR H-DARRIEUS: Aerogerador com rotor em eixo vertical e pás verticais posicionadas em paralelo (Figura 18).

Figura 18 - Rotor H-Darrieus.



Características:

- Mais eficiente que o tipo Darrieus;
- Modelos com motores sem núcleo não precisam de aceleração inicial;
- Muito silencioso.

A escolha de um minigerador adequado ao projeto faz toda a diferença na hora de calcular o custo benefício. Sempre é importante levar em consideração a velocidade mínima do vento para o funcionamento do microgerador eólico, velocidade do vento que o microgerador eólico alcança a potência nominal e velocidade (máxima) de vento em que o microgerador eólico desliga. Não sendo menos importante, antes de tudo, deve ser feito um levantamento do consumo de eletricidade da casa ou estabelecimento por um determinado período, onde deseja instalar o gerador, para calcular qual deve ser a capacidade de seu sistema eólico. Depois que essa etapa for cumprida é importante o reconhecimento da área onde se deseja instalar o sistema, como por exemplo, avaliar as condições físicas para então definir o gerador adequado. Isso inclui a medição dos ventos e a escolha do posicionamento que proporcione melhor eficiência. Um gerador de pequeno porte deve levar em consideração tanto a intensidade e a regularidade dos ventos quanto a continuidade da direção

2.4.5 Vantagens, Desvantagens e viabilidade de um projeto com Microgerador Eólico

➤ Vantagens:

- Não emite gases de efeito estufa;
- Não emite gases poluentes;
- Não gera resíduos na sua operação;
- Transformação limpa do recurso energético natural (o vento);
- O sistema é bastante durável e precisa de pouca manutenção.

➤ Desvantagens:

- Se houver mal estudo de mapeamento, precisão e medição dos ventos no local, não se tornam fontes confiáveis;
- Possuem custos de investimento elevado;
- Poluição visual;
- Poluição sonora.

➤ Viabilidade:

- Incidência de velocidade dos ventos na região;
- Tipo de topografia da região;

- Altitude da região;
- Condições climáticas;
- Custo de mão de obra e material.

2.4.6 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2016), desde 17 de abril de 2012 ela criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, e desde então o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Na Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, definiu o Sistema de Compensação de Energia Elétrica como sendo,

“Um arranjo no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com Microgeração ou Minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.”

Esse sistema ainda é conhecido pelo termo inglês *net metering*, onde nele é o consumidor que instala seu pequeno gerador em sua unidade consumidora, (por exemplo, uma pequena turbina eólica), e a energia gerada é usada no abate do consumo de energia elétrica da anuidade. Quando a geração for maior que o consumo, o saldo positivo de energia pode ser usado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura do mês seguinte. Esses créditos que ficam da energia gerada continuam válidos por 60 meses. Diante disso, ainda há a possibilidade do consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão e caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidores (por exemplo, condomínios).

Importante lembrar que, para os consumidores conectados em alta tensão (Grupo A), será dividida apenas a parcela da fatura correspondente à demanda contratada, já para os consumidores conectados em baixa tensão (Grupo B), mesmo que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será dividido o pagamento referente ao custo de disponibilidade –

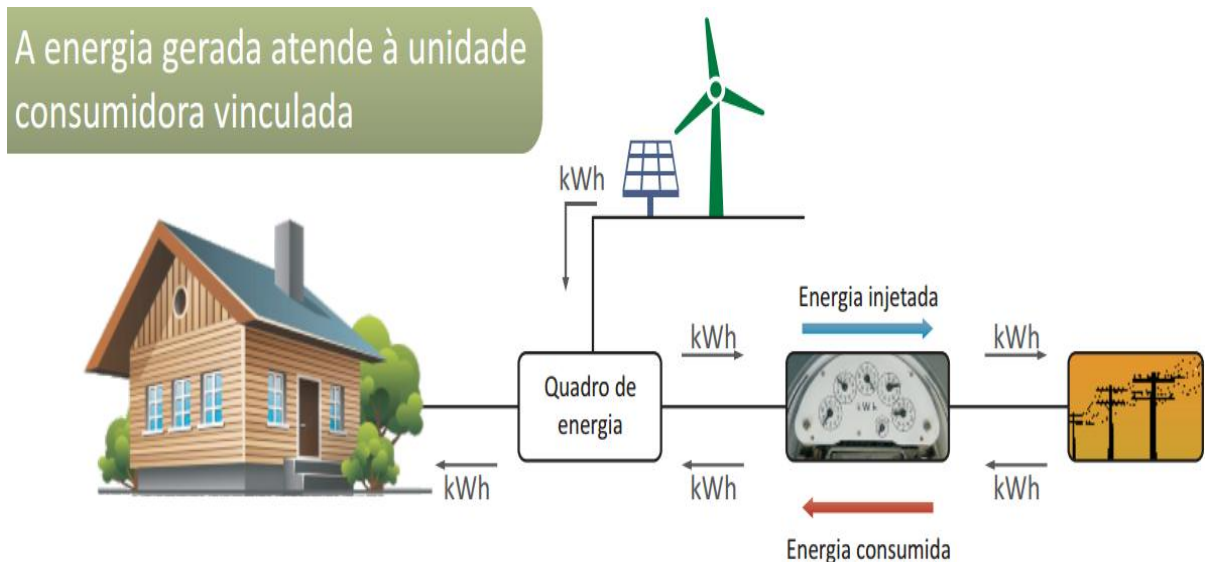
valor em reais equivalente a 30 KWh (monofásico), 50 KWh (bifásico) ou 100 KWh (trifásico).

Nos momentos em que a central não gera energia suficiente para abastecer a unidade consumidora, a rede da distribuidora local suprirá a diferença. Nesse caso será utilizado o crédito de energia, ou caso não haja, o consumidor pagará a diferença. A Figura 19 ilustra essa ideia.

Quando a unidade consumidora não utiliza toda a energia gerada pela central, ela é injetada na rede da distribuidora local, gerando crédito de energia (Figura 19).

- Grupo A: paga apenas a parcela referente à demanda;
- Grupo B; paga apenas o custo de disponibilidade;

Figura 19 - sistema de compensação de Energia Elétrica.



Fonte: (ANEEL, 2016)

2.5 CONCEITO *SMART GRID*

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) estão prestes a sofrer uma transformação de grandes proporções. Consiste na modernização das tecnologias de geração, transmissão, distribuição e uso final da energia elétrica, visando abordar questões que vão desde as preocupações com mudanças climáticas e o envelhecimento das instalações atuais até a possibilidade de proporcionar ao usuário final maior participação no planejamento e operação

do sistema. Essa nova tendência leva o nome de *Smart Grid* ou simplesmente no português pode ser chamada de Redes Inteligentes.

A expressão *Smart Grid* deve ser vista mais como um conceito e não como uma nova tecnologia ou equipamento que consiste na utilização intensiva de tecnologia de automação, computação e comunicações para monitoração e controle da rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso, define Falcão (2009).

A transformação da rede atual de distribuição elétrica para a *Smart Grid*, acontecerá de forma gradual: novas tecnologias de automação, computação e comunicação serão introduzidas em parte na rede, formando bolsões de sub-redes com as características da *Smart Grid*. As Microrredes chegam como uma das inovações tecnológicas mais promissoras implementadas pela *Smart Grid*, as quais são uma forma eficiente de se conectar fontes de energia de diferentes tipos e capacidades, dispositivos armazenados de energia e cargas especiais.

O tema *Smart Grid* hoje é reconhecido como uma tendência mundial no desenvolvimento das infraestruturas de distribuição e transmissão de energia elétrica e de telecomunicações, havendo diversos projetos pilotos em fase de implementação em diversos países de todos os continentes. As redes inteligentes têm o potencial de aumentar a racionalização e a eficiência do uso da energia elétrica, reduzindo, assim, o desperdício de recursos naturais para sua geração bem como a resultante emissão de gases causadores de efeito estufa. A existência de um sistema *Smart Grid* é uma condição facilitadora à implantação da Geração Distribuída em caráter universal e extensivo, já que possibilita que qualquer consumidor se torne um produtor e forneça energia ao Sistema Elétrico.

2.5.1 Caracterização de uma *Smart Grid*

Algumas características que são atribuídas à *Smart Grid*:

- Auto-Recuperação: capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede;

- Empoderamento do Consumidor: habilidade de incluir os equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede;
- Tolerância a Ataques Externos: capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e cyber-ataques;
- Qualidade de Energia; prover energia com qualidade exigida pela sociedade digital;
- Acomodar uma Grande Variedade de Fontes e Demandas: capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologia;
- Reduzir o Impacto do Sistema Produtor de eletricidade: reduzindo perdas e utilizando fontes de baixo impacto ambiental;
- Viabilizar e Beneficiar-se de Mercados Competitivos de Energia; favorecer o mercado varejista e a microgeração.

2.5.2 Tornando a *Smart Grid* uma realidade

Para que a *Smart Grid* seja implantada adequadamente e obtenha sucesso é necessário que siga o seguinte modelo:

- Instalação da infraestrutura de dispositivos inteligentes;
- Instalação da infraestrutura de comunicações;
- Integração e interoperabilidade;
- Disponibilização de ferramentas analíticas;
- Otimização operativa.

2.5.3 Tecnologias viabilizadoras

Geração Distribuidora e Geração Local: A utilização de fontes limpas para a geração caseira de eletricidade é uma tendência que vem tomando grandes proporções nos dias atuais e com a chegada da *Smart Grid* e por meio do sistema de distribuição inteligente, devidamente instalado, fica possível repassar a própria produção para grandes concessionárias.

Sistema de Medição: A coleta de dados do consumo e a transferência da energia produzida é feita de forma automática, processando os dados e gerando padrões de consumo. Permitindo estimar a necessidade de energia, caso a demanda seja maior, mais energia é providenciada, nesse caso seria um sistema excelente para evitar os apagões.

Tarifação Dinâmica: Como o consumo pode ser acompanhado em tempo real, surgirá a possibilidade dessa nova modalidade de tarifação, que consiste em variar o preço de acordo com o horário em que a energia foi utilizada, por exemplo, em horários de pico a energia ficaria mais cara, já em outros horários como a madrugada, teria uma taxa reduzida do preço da energia fornecida.

Aparelhos inteligentes: Equipamentos elétricos, de uso residencial ou não, estão sendo preparados com recursos de controle que podem gerenciar o consumo nesses determinados lugares. A utilização de Tecnologia da Informação (TI), proporciona a convergência de tecnologias de proteção, controle e supervisão em equipamentos padronizados os quais recebem a denominação de IEDS (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes). Esses dispositivos são os elementos de interfaceamento da infraestrutura de comunicações e processamento de informação com o sistema de energia elétrica. Há equipamentos específicos para a medição e coleta dos dados, que são capazes de traçar um perfil de consumo em grandes áreas geoeletricas.

2.5.4 Benefícios de uma Rede Inteligente

A medição inteligente será uma importante ferramenta que as concessionárias de energia elétrica terão para aumentar sua eficiência operacional, melhorar o atendimento ao cliente, promover a racionalização da energia, promover deslocamento de carga, principalmente nos horários de pico, agilizar o processo de fatura e reduzir custos, reduzir as perdas na distribuição de energia e facilitar o controle e operação do sistema elétrico de transmissão e principalmente do sistema de distribuição.

Para os consumidores os benefícios serão de grande importância, uma vez que será maior a confiabilidade no processo de fatura, já que passará a ser automático e preciso, também tendo a possibilidade de acompanhar em tempo real a energia que está sendo consumida e a que está sendo gerada, facilitando para que o consumidor possa planejar a utilização dos equipamentos e com isso reduza o valor de sua fatura mensal.

Em um período onde há a discussão de como diminuir as emissões de gases no efeito estufa, a Rede Inteligente chega com a possibilidade da introdução de novas tecnologias no gerenciamento da geração e consumo, mostrando uma solução de forma de geração limpa, já que ela acionará as formas de energias poluentes apenas em períodos críticos de demanda e baixa frequência. Através do gerenciamento local da rede elétrica, a Rede Inteligente permitirá a integração da Geração Distribuída, realizada através de pequenos geradores.

“Para Oliveira *et al.* (2012), os benefícios de uma Rede Inteligente serão alcançados com a utilização em larga escala de sensoriamento e automação de toda a rede de transmissão e distribuição de energia elétrica, os quais deverão ser suportados por uma infraestrutura de comunicação (telecomunicação) a fim de que os dados gerados nos diversos pontos de medições possam ser analisados. Dessa forma, o estado da rede poderá ser conhecido em tempo real, permitindo uma atuação mais eficiente em relação às prevenções ou quando da ocorrência de problemas na rede elétrica.”

A qualidade percebida pelo consumidor deve ser avaliada a partir de três grandes aspectos: a qualidade do atendimento ao consumidor (ou qualidade comercial), a qualidade do “produto” energia elétrica (relacionada à conformidade da tensão em regime permanente e à ausência de perturbações na forma de onda) e a qualidade do serviço (relacionada à continuidade na prestação do serviço). Para manter os indicadores de continuidade em níveis adequados, as distribuidoras devem ter a capacidade de: localizar a falha em sua rede, deslocar uma equipe de atendimento emergencial, identificar as causas da interrupção e atuar na rede de forma a corrigir o problema. As redes inteligentes propiciarão uma melhor gestão do sistema de distribuição. Ajudarão na localização da ocorrência das falhas e na identificação das suas causas. Além disso, será possível uma melhor coordenação dos equipamentos de proteção, que podem isolar a falha, minimizando a quantidade de consumidores afetados pelo desligamento. Assim, as redes inteligentes poderão propiciar uma melhoria da continuidade do fornecimento de energia elétrica ao consumidor final.

2.5.5 Cenário Atual

As Redes Inteligentes de energia elétrica já se encontram bem difundidas nos Estados Unidos, assim como também em alguns países da Europa, da Ásia e até Oriente Médio, onde algumas empresas já começaram a investir para adquirir medidores inteligentes, em

automação e em plataforma de comunicação de dados, a fim de otimizar a operação de suas redes elétricas, tornando os serviços oferecidos por elas mais eficiente e possibilitando aos clientes serem mais participativos no consumo.

No Brasil a inserção da *smart grid* caminha mais lentamente, mas mesmo assim grandes concessionários do país já anunciaram projetos nessa área, como a Light, AES e Eletropaulo. O que já é realidade no país é a automação das subestações. Um dos maiores problemas para um avanço maior é o alto custo de implantação desse sistema. Nesse sentido está sendo implantado no país em alguns Estados as *Smart Cities* (Cidades Inteligentes), que consiste na utilização das redes inteligentes visando à habilitação de diversos serviços de utilidade pública, além do serviço de distribuição de eletricidade, tais como: controle de semáforo e de tráfego, iluminação pública, segurança pública e telecomunicações. Para construir tal cidade seria necessário o esforço de diversos agentes. Dessa forma, os investimentos seriam divididos entre as concessionárias, o que tornaria o processo menos custoso também para a própria distribuidora de energia elétrica.

Entretanto, antes de colocar em prática em grande escala, são necessários vários testes para garantir a eficiência do sistema. No Brasil existem quatro projetos de grande importância nessa área: o projeto Cidade do Futuro, realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), no município de Sete Lagoas; o projeto Parintins, implantado pela Eletrobrás no município de Parintins (AM); o projeto InovCity, realizado pela Bandeirante, em Aparecida (SP) e em dois municípios do Espírito Santo; e o projeto Cidade Inteligente Búzios, realizado pela Ampla, em Armação de Búzios (RJ).

Esses projetos foram lançados em 2009 e finalizados operacionalmente em 2014. Durante os quase 5 anos de trabalho foram implantados cerca de mil medidores inteligentes, com a capacidade para leitura, corte e religa operados remotamente; a implantação de 46 pontos de automação com *selfhealing*, software para otimizar o processo de operação do sistema na reconfiguração da rede; a implantação de várias mídias de comunicação para testes, tais como: rede de fibra óptica, rádios 400 MHz, gateways, sistema celular, rede HFC (*Hybrid fiber-coaxial*), satélite; e a instalação de 66 painéis fotovoltaicos conectados à rede para estudo dos impactos de sua utilização nas redes da Cemig.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Como complemento ao trabalho para análise da viabilidade do conceito *Smart Grid*, foi feita uma simulação em uma residência na cidade de Caraúbas, Rio Grande do Norte, onde foi utilizado um gerador eólico de pequeno porte que através da Geração Distribuída seria injetada na rede a produção em energia do gerador para então calcular qual a economia que se teria ao longo do tempo.

Primeiramente é necessário saber a média anual do vento no local, através de um mapa eólico. Em seguida através das equações de Weibull encontrará o fato c de Weibull (fator de escala) utilizando a Equação 7 (LYSEN, 1983), ou no site da CRESESB (2001).

$$c = \frac{\bar{v}}{r(1+\frac{1}{k})} [ms] \quad (7)$$

Logo após, é necessário estimar o parâmetro de Weibull (fator de forma), utilizando a ferramenta disponível pelo CRESESB (2010), pela localização geográfica. Em seguida calcula-se a distribuição de frequência de Weibull $f(v)$, Equação 8 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001):

$$f(v) k \frac{v^{k-1}}{c^k} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

A energia extraída dos eventos depende do tipo de aerogerador que for escolhido, então para o cálculo mensal da energia foi utilizado as curvas de potência do equipamento, para conseguir a potência em KW de acordo com a velocidade. Dessa forma, com a Equação 9, estima-se a Produção Mensal de Energia (PME).

$$PME = \frac{\sum P(v) x f(v) x 720}{1000} [MWh] \quad (9)$$

onde 720 é o equivalente de horas no mês.

Para obter os resultados desejados foi utilizado uma ferramenta disponível pelo CRESESB, onde foi determinada a velocidade média do vento em m/s, e os parâmetros de Weibull k (fator de forma) e c (fator de escala), informando apenas as coordenadas geográficas do local desejado. Sabendo que a localização de Caraúbas é 5°47'33''S e

37°33'24''O (Google Earth). O ponto específico escolhido para realização do estudo de caso foi 5°46'58,34''S e 37°33'28,44''O.

Para determinar a velocidade do vento, utilizamos as referências de um aerogerador do tipo AIR 40, Figura 20.

Figura 20 - Aerogerador AIR 40.



Fonte: http://www.primuswindpower.com/files/4813/8919/3512/Air_Spec_Sheet_7-2013.pdf. Acesso em: 4 nov. 2016

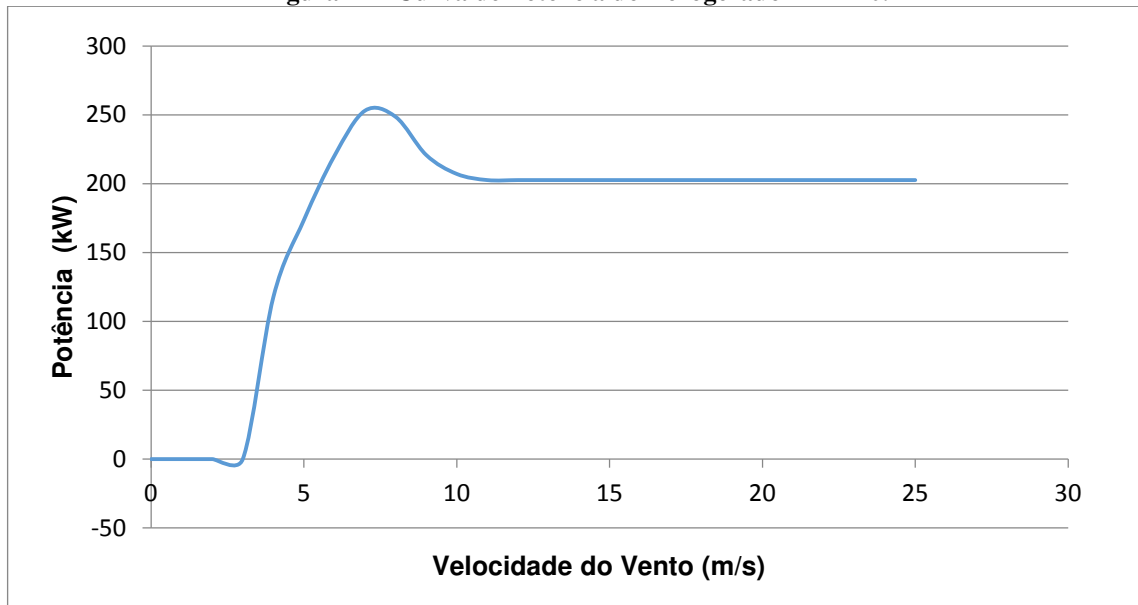
Com as seguintes especificações:

- Diâmetro do rotor: 1.17m;
- Peso: 5.9 kg;
- Vento para início de geração: 3.13 m/s;
- Potência nominal: 160 watts a 12.5 m/s (300 W pico);
- Voltagem nominal: 12V, 24V e 48V (selecionado de fábrica);
- Controlador da turbina: Microprocessador regulador interno inteligente;
- Corpo: Alumínio reforçado de altíssima qualidade;
- Hélices: Plástico;
- Proteção de sobrecarga: Controle eletrônico de torque;
- Produção de energia: 40 kwh/mês a 5.8 m/s;
- Vento limite: 49.2 m/s (177 km/h);
- Dimensões da embalagem: 686 x 318 x 229 mm (7.7 kg);
- Manutenção: Não requer, livre de manutenções.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nas informações fornecidas pelo fabricante, foi determinada a curva de potência do aerogerador AIR 40, apresentada na Figura 21.

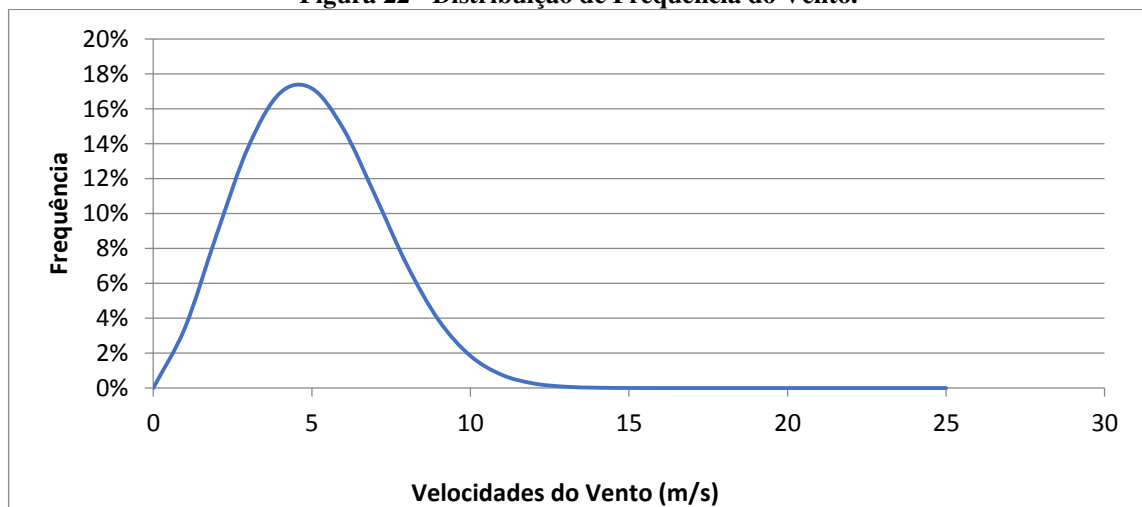
Figura 21 - Curva de Potência do Aerogerador AIR 40.



Fonte: O autor

Para determinar a frequência de ocorrência do vento no local escolhido, foi utilizada a Equação 8 com os parâmetros k e c de Weibull obtidos junto ao CRESESB, conforme a metodologia. Com base nesses valores obteve-se a Frequência de Weibull na Figura 21.

Figura 22 - Distribuição de Frequência do Vento.



Fonte: O autor

Em seguida, com os valores de frequência de vento e potência convertida pelo aerogerador determinados para cada velocidade, conforme mostra a Tabela 1, foi calculada a produção mensal do aerogerador para cada velocidade utilizando a Equação 9, conforme a metodologia.

Tabela 1 - Produção de energia do Aerogerador AIR 40.

Velocidade	Frequência	Produção Nominal do Aerogerador AIR 40	Produção Real do Aerogerador AIR 40
0	0%	0	0,00
1	3%	0	0,00
2	9%	0	0,00
3	14%	0	0,00
4	17%	117,7	14,33
5	17%	173,71	21,47
6	15%	220,37	23,53
7	11%	253,15	20,07
8	7%	248,64	12,62
9	4%	220,93	6,18
10	2%	207,17	2,75
11	1%	202,69	1,10
12	0%	202,69	0,38
13	0%	202,69	0,11
14	0%	202,69	0,03
15	0%	202,69	0,01
16	0%	202,69	0,00
17	0%	202,69	0,00
18	0%	202,69	0,00
19	0%	202,69	0,00
20	0%	202,69	0,00
21	0%	202,69	0,00
22	0%	202,69	0,00

Fonte: O autor

Somando os valores de produção para cada uma das velocidades, a produção estimada de geração de energia pela máquina foi de 102,57 kwh/mês.

A residência em questão na qual foi feita a simulação no município de Caraúbas, para o mês de setembro, teve um consumo de 101 KW/h. Sabendo que o local possui uma ligação monofásica e de acordo com a regulamentação da Geração Distribuída, para uma ligação monofásica mesmo que a geração seja maior do que o consumo, como foi nesse caso, ainda assim tem que se pagar a taxa de disponibilidade que é referente aos custos que a concessionária tem de manter sua ligação. A Tabela 2 mostra os seguintes resultados dos cálculos, onde foram utilizados o preço da tarifa que é 0,54 R\$/kWh da concessionária, sem os impostos cobrados e a taxa de disponibilidade para a ligação monofásica que é 30 KWh.

Tabela 2 - Consumo e geração para o mês de Setembro.

Mês	Consumo (KWh)	Injetada (KWh)	Fatura sem GD	Fatura com GD	Economia por Mês
Setembro	101	102,57	R\$ 54,54	R\$ 16,20	R\$ 38,34

Fonte: O autor

Sem a Geração Distribuída nessa residência, em média a conta anual seria de R\$ 654,48, com a Geração Distribuída esse valor cairia para R\$ 194,40, gerando uma economia anual de R\$ 460,08. O aerogerador utilizado para essa simulação custa o equivalente a R\$5.360,00, então só após aproximadamente onze anos e seis meses o consumidor conseguiria tirar o que foi investido. Sabendo que um aerogerador desse nível tem vida útil de mais ou menos 20 anos, então após os 20 anos de uso tirando o que foi investido o consumidor ainda conseguiria uma economia equivalente a R\$3.841,60. Diante desses resultados o conceito de *Smart Grid* acoplado a Geração Distribuída utilizando um aerogerador de pequeno porte, torna-se viável a longo prazo para uma residência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma breve introdução das tecnologias viabilizadores da implantação do conceito de *Smart Grid* nos sistemas de energia elétrica e como a Geração Distribuída está auxiliando nesse processo. O Brasil está avançando nessa área através de pesquisas e novos aperfeiçoamentos para que esse projeto seja o mais viável possível. A energia eólica surge como uma fonte promissora nesse contexto, onde o Brasil ocupa uma colocação privilegiada da geração dessa fonte que está em grande expansão no país. Com todos os benefícios que estão ligados a Geração Distribuída, num futuro não muito distante essas tecnologias tendem a cair ainda mais o preço por ter se tornado muito usual. A integração dessas tecnologias produzirá um ambiente com grande potencial para a melhoria no desempenho desses sistemas no que diz respeito à confiabilidade e qualidade do suprimento, economia na operação e expansão, redução de emissões e participação ativa de consumidores.

Em relação ao futuro das redes e Cidades Inteligentes no Brasil, a viabilidade técnica existe e já foi comprovada em diversos países. Para a implantação no Brasil ainda existem alguns desafios tecnológicos a serem vencidos, principalmente ligados às condições das instalações elétricas e econômicas. Por isso, os projetos que estão sendo realizados em algumas cidades brasileiras são de grande importância, uma vez que, além de levarem conforto aos usuários, oferecerem treinamento e capacitação aos funcionários a respeito do melhor uso das tecnologias. Esses projetos são necessários, pois é através deles que surgem as primeiras compras que são essenciais para gerar escala de produção onde daí em diante vão ocorrendo a diminuição dos preços.

Com o aumento da demanda por essas tecnologias entre os agentes do setor e a evolução de políticas públicas que favoreçam o desenvolvimento das Cidades Inteligentes, essas tecnologias ganharão maior escalabilidade e se tornarão mais viáveis. Portanto a *Smart Grid* é uma promissora evolução no setor energético que promoverá bastante facilidade na vida do consumidor, tornando-o mais ativo na sua própria geração de energia elétrica e ao mesmo tempo controlando seu consumo em tempo real.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica. 2016. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/>>. Acesso em: 18 Out. 2016.

ALVES, José Jakson A. **Análise Regional da Energia Eólica no Brasil**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Pós-graduação em Recursos Naturais. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). p.167, 2009.

ANEEL. **Geração Distribuída Supera 1000 Conexões no Brasil**. Ed.1. Brasília. Aneel, 2015.

ANEEL **Micro e Minigeração Distribuída**. Ed.2. Brasília. Aneel, 2016. p.79-82.

ALDABÓ, Ricardo. **Célula Combustível a Hidrogênio: Fonte de energia da nova era**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CONCEIÇÃO, Luciana de Freitas. **Microgeração de Energia Elétrica Através de Sistema híbrido Eólico / Solar para uso Residencial**. 2013. Monografia (Pós Graduação) – Curso de Especialidade em Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2013.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Eólico. **CRESESB**, 2003. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_RN.pdf>. Acesso em: 20 Out. 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Eólico. **CRESESB**, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=221>. Acesso em: 20 Out.2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO

BRITO. As Energias Solar e Eólica. **CRESESB**, 2013. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/download/casasolar/casasolar2013.pdf>>. Acesso em: 21 Out. 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Eólico. **CRESESB**, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=221>. Acesso em: 20 Out.2016.

D.M. Falcão, "**Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é Presente**," Anais do VIII SIMPASE, Rio de Janeiro RJ, 9-14 Agosto de 2009.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Statistics**. GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015.Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>.

LOPES, Ricardo Aldabó. **Energia eólica**. 2º. Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

LYSEN, E. H. **Introduction to Wind Energy**. 2ª ed. Amersfoort: CWD – Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, 1983.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Smart Grid**. 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157>. Acesso em: 28 Out. 2016.

OLIVEIRA, R. D. et al.; **Benefícios e Desafios de Redes Inteligentes**. Revista Eletrônica de Energia, Salvador, v. 2, n. 1, p. 3-14, 2012.

PEREIRA, M. G. et al.; **Mercado de Energia Eólica de Pequeno Porte no Brasil**. In: BRASIL WINDPOWER, 2015, Rio de Janeiro.