



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SANDRO ROBERTO NASCIMENTO ARAUJO

**MICROGERAÇÃO EÓLICA CONECTADA À REDE
ELÉTRICA PARA USO RESIDENCIAL**

FORTALEZA

2016

SANDRO ROBERTO NASCIMENTO ARAUJO

**MICROGERAÇÃO EÓLICA CONECTADA À REDE
ELÉTRICA PARA USO RESIDENCIAL**

Monografia submetida à Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Almeida do Nascimento.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A691m Araujo, Sandro Roberto Nascimento.
Microgeração eólica conectada à rede elétrica para uso residencial / Sandro Roberto Nascimento Araujo. –
2016.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. José Almeida do Nascimento.

1. Microgeração eólica. 2. Fontes renováveis. I. Título.

CDD 621.3

SANDRO ROBERTO NASCIMENTO ARAUJO

MICROGERAÇÃO EÓLICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA PARA USO RESIDENCIAL

Esta monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pela Coordenação do curso da Universidade Federal do Ceará.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almeida do Nascimento (Orientador).

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MSc. Tomaz Nunes Cavalcante Neto

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. MSc. Jéssica Santos Guimarães

Universidade Federal do Ceará (UFC)

DEDICATÓRIA

Aos meus familiares e à minha noiva.

AGRADECIMENTOS

À minha noiva, Tássia Haline, pelo carinho, dedicação, amizade e pela paciência para comigo.

A todos os professores e colegas do curso de Engenharia Elétrica responsáveis diretamente ou indiretamente pela minha formação como engenheiro eletricista.

RESUMO

Este trabalho apresenta o resultado de uma simulação da análise de viabilidade econômica-financeira para implantação de um sistema de microgeração distribuída baseado em energia elétrica produzida a partir de um sistema eólico, tendo como local de instalação a cidade de Fortaleza no estado do Ceará. Para essa simulação foi avaliado o potencial eólico local, escolhidos componentes comerciais para estudo de caso e, por fim, realizada análise da viabilidade econômica do projeto através de métodos de engenharia econômica, como: Valor Presente Líquido (VPL), de Taxa Interna de Retorno (TIR) e de *payback* simples. O estudo ratifica a importância de se incluir na matriz energética fontes renováveis de energia e o uso da geração distribuída como forma de se ter uma produção de energia elétrica menos centralizada. Pôde-se concluir, através dos métodos de avaliação e análise, que a microgeração eólica, aplicada em uma residência, com consumo mensal médio de 100 kWh, não se apresenta atrativa para o investimento.

Palavras-chave: Microgeração Eólica. Microgeração Distribuída. Energia Eólica. Fontes renováveis.

ABSTRACT

This work presents the results of a simulation of the economic-financial feasibility analysis for the implementation of a distributed micro-generation system based on electric energy produced from a wind system, having as its location the city of Fortaleza in the state of Ceará. For this simulation the local wind potential was evaluated, commercial components were selected for case study and finally, economic feasibility analysis of the project was performed through economical engineering methods, such as: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and simple payback. The study ratifies the importance of including renewable sources of energy in the matrix and the use of distributed generation as a way to have a less centralized electricity production. It can be concluded through the methods of evaluation and analysis that the wind micro-generation, applied in a residence, with average monthly consumption of 100 kWh, is not attractive for the investment.

Keywords: Wind Microgeneration. Distributed Microgeneration. Wind Energy. Renewable Energy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivo Geral	13
1.3 Estrutura do Trabalho	13
CAPÍTULO 2	15
2 SISTEMAS PARA A MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE	15
2.1 Energia Eólica	16
2.2 Energia Solar	18
2.3 Energia Maremotriz	20
2.4 Energia de Biomassa	22
2.5 Sistema De Microgeração Eólica	23
2.5.1 Vantagens e Desvantagens	32
2.5.2 Viabilidades	33
CAPÍTULO 3	34
3 A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	34
3.1 Vantagens da Geração Distribuída	35
3.2 Critérios Gerais Sobre Conexão da Geração Distribuída	36
3.3 Regulamentação e Legislação para a Microgeração	37
3.3.1 Resolução Normativa nº 687 da ANEEL	37
3.3.2 PRODIST	38
CAPÍTULO 4	40
4 ESTUDO DE CASO	40
4.1 Análise da Viabilidade do Uso de uma Microgeração Eólica em uma Unidade Consumidora Residencial	40
4.2 Resultados	46
CAPÍTULO 5	48
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS	50

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Microgeração de energia elétrica.	15
Figura 2 – Energia eólica.....	16
Figura 3 – Panorama do potencial eólico brasileiro	18
Figura 4 – Energia solar.....	18
Figura 5 – Energia maremotriz.	21
Figura 6 – Energia de biomassa.....	22
Figura 7 – Gerador eólico.....	24
Figura 8 – Turbina de eixo horizontal.	25
Figura 9 – Turbina de eixo vertical.	26
Figura 10 – Microgerador eólico.	27
Figura 11 – Gerador eólico de grande porte.	28
Figura 12 – Sistema de microgeração eólica conectada à rede de distribuição.....	30
Figura 13 – Inversor de frequência.....	31
Figura 14 – Medidor bidirecional.	32
Figura 15 – Curva de potência Gerar246.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mínimos em função da potência instalada.....	38
Tabela 2 – Consumo da residência.....	41
Tabela 3 – Custo do material.....	43
Tabela 4 – Cálculo do valor presente a uma taxa de atratividade de 7,9448% ao ano	45
Tabela 5 – Resultado da simulação	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CNPJ	Cadastro de Pessoa Jurídica
CPF	Cadastro de Pessoa Física
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EPE	Plano Decenal de Expansão de Energia 2024
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBTs	<i>Insulated Gate Bipolar Transistors</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SCRS	Retificadores Controlados de Silício
SPE	Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UFC	Universidade Federal do Ceará
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
VPL	Valor Presente Líquido
WBA	<i>World Bioenergy Association</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	dióxido de Carbono
Hz	hertz
V	volt
W	watt
Wh	watt-hora
Wp	watt-pico

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, fontes de energia renovável têm um papel cada vez mais importante, tanto no Brasil como no mundo, no sentido de contribuírem, cada vez mais, para a conservação do planeta, do desenvolvimento econômico ou da criação de emprego por todo o mundo.

A energia eólica tem se revelado ao longo dos anos muito proveitosa juntamente com os outros tipos de energias renováveis para o desenvolvimento e preservação do planeta.

Historicamente a geração de energia elétrica por fonte dos ventos surgiu na cidade de *Cleveland, Ohio*, em 1888, por Chales F. Bruch que ergueu o primeiro aerogerador destinado à geração de energia elétrica, utilizando-se de um conceito antigo de 2 mil a.C. na antiga Babilônia e 200 a.C. na antiga Pérsia dos moinhos de ventos que serviam na época para moer grãos, que depois no século XI d.C. foi levado do Oriente Médio a Europa pelos cruzados europeus.

Atualmente a produção de energia eólica não é feita apenas em grande escala, a microprodução de energia eólica tem crescido cada vez mais, tanto no Brasil como no mundo. No Brasil, a geração e a microgeração de energia elétrica por fontes renováveis, atualmente são mais conhecidas nos meios acadêmicos e empresariais, por conta da grande diversidade e abundância desses recursos que o Brasil possui.

A população brasileira, em geral, desconhece a fundo sobre a microgeração de energia elétrica por fontes renováveis, devido a falta de incentivos políticos e financeiros para a sua implantação, porém em 17 de abril de 2012 o Governo Brasileiro através da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou a Resolução Normativa nº 482 que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração de energia elétrica distribuída, que atualmente foi revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015.

Neste estudo será apresentado o que é uma microgeração de energia elétrica eólica, suas vantagens e desvantagens, algumas políticas públicas já iniciadas para a sua implantação e uma análise da viabilidade desse tipo de microgeração.

1.1 Justificativa

A energia elétrica é considerada um elemento de grande necessidade sendo utilizada em quase todas as atividades diárias, trazendo conforto, rapidez e maior versatilidade, sendo fundamental no cotidiano e no crescimento econômico mundial. Mas com perspectivas de mudanças nos próximos anos, como as climáticas, aumento da população global e desenvolvimento de novas tecnologias, a busca por mais eficiência e combustíveis mais limpos vem crescendo de forma acelerada. Contudo, modernas tecnologias trazem novos recursos e torna a energia elétrica mais acessível, criando novas oportunidades de emprego e expandindo o comércio e a indústria pelo mundo.

1.2 Objetivo Geral

Como principal motivação da elaboração deste trabalho, surge a necessidade de estudar e descrever um sistema, a partir da fonte eólica, de microgeração de energia elétrica conectado à rede de distribuição. O sistema tem como objetivo converter a energia eólica disponível no vento em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica gerada pelo gerador eólico para o nível de amplitude e frequência exigidos pela rede de distribuição de energia elétrica.

A solução proposta é baseada na microgeração distribuída, com a utilização do medidor bidirecional de energia elétrica.

1.3 Estrutura Do Trabalho

Para o desenvolvimento da monografia, foi realizada uma pesquisa bibliográfica na literatura especializada existente sobre o assunto de microgeração eólica conectada à rede de distribuição, no sentido de se obter subsídios adicionais que contribuíssem para o texto formando assim o capítulo 1.

O capítulo 2 é composto pela apresentação dos sistemas mais utilizados para a microgeração de eletricidade, tendo como foco principal o sistema micro eólico, descrevendo o seu princípio de funcionamento bem como suas vantagens, desvantagens e sua viabilidade.

No capítulo 3, é realizado um detalhamento da geração distribuída, definição e suas vantagens na implementação com a rede elétrica, é mostrada a regulamentação e legislação para

a microgeração, abordando as condições gerais para aplicação desse sistema.

Já no capítulo 4 descreve-se o estudo de caso sobre a viabilidade do uso de uma microgeração eólica em uma unidade consumidora residencial. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

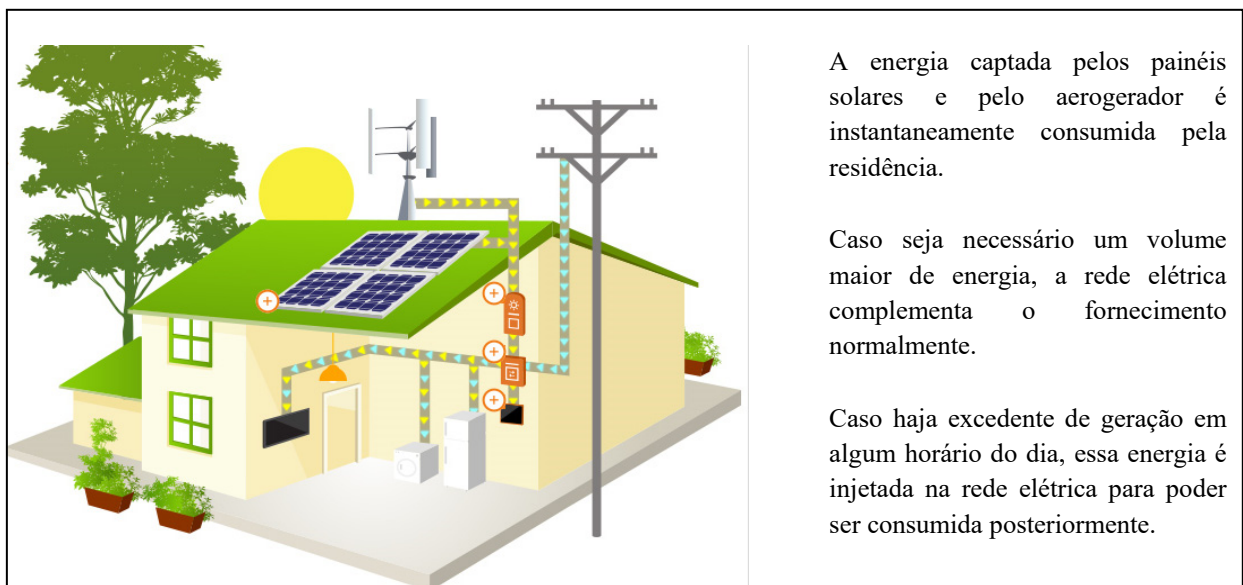
2 SISTEMAS PARA A MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Os governos, ao redor do mundo, estão confiando consideravelmente nas fontes de energia renováveis como tecnologias importantes para reduzir os problemas ambientais relacionados à energia, particularmente as emissões de CO₂. Em alguns países em desenvolvimento, como China, Índia e Brasil, há incentivos políticos concentrados nas chamadas novas energias renováveis, tais como energia eólica, biomassa e energia solar (fotovoltaica). Algumas dessas tecnologias obtiveram grandes progressos, com uma substancial redução de custos e rápida expansão do mercado. Outras estão ainda em fase de desenvolvimento e estudos. Não há dúvidas de que se espera um grande crescimento destas contribuições, mas serão necessários um crescimento sustentável e uma significativa redução de custos.

A microgeração é definida como uma geração de energia com baixo teor de carbono produzida por indivíduos, pequenas empresas ou comunidades.

Logo abaixo, na Figura 1, se apresenta um sistema de microgeração de energia elétrica em uma residência.

Figura 1 – Microgeração de energia elétrica.



Fonte: PRATIL (2015)

A seguir, será apresentado um levantamento das principais fontes de energia renováveis para microgeração de eletricidade.

2.1 Energia Eólica

Começando pela energia eólica, como pode ser vista na Figura 2, que constitui uma fonte limpa e disponível em todos os lugares. Os países que mais a utilizam são a China, a Alemanha, a Dinamarca e os Estados Unidos. Na Dinamarca, por exemplo, a contribuição eólica é de 42% da energia elétrica total produzida (ENERGINET, 2016), na Alemanha, a contribuição eólica já passou de 36% (CANALTECH, 2016).

Figura 2 – Energia eólica.



Fonte: ÉPOCA NEGÓCIOS (2014)

As informações disponíveis de capacidade instalada de geração eólica no mundo remontam somente ao ano de 1980, com o montante de 7 MW. Entre 2000 e 2015, a taxa média de crescimento foi de 23,7% ao ano. O acréscimo de 62,8 GW de potência eólica, em 2015, repondeu por 27% da expansão mundial de toda as fontes (SPE/MME, 2016).

A participação da geração eólica na geração total mundial, que era praticamente nula em 1980, em 2015 já atingia 3,5% (2,7% em 2013). Os Estados Unidos apresentam a maior

participação na geração eólica mundial, de 22,9%, mas a China pode assumir a 1ª posição em 2016. A Dinamarca foi pioneira na geração eólica (100% em 1980) (SPE/MME, 2016).

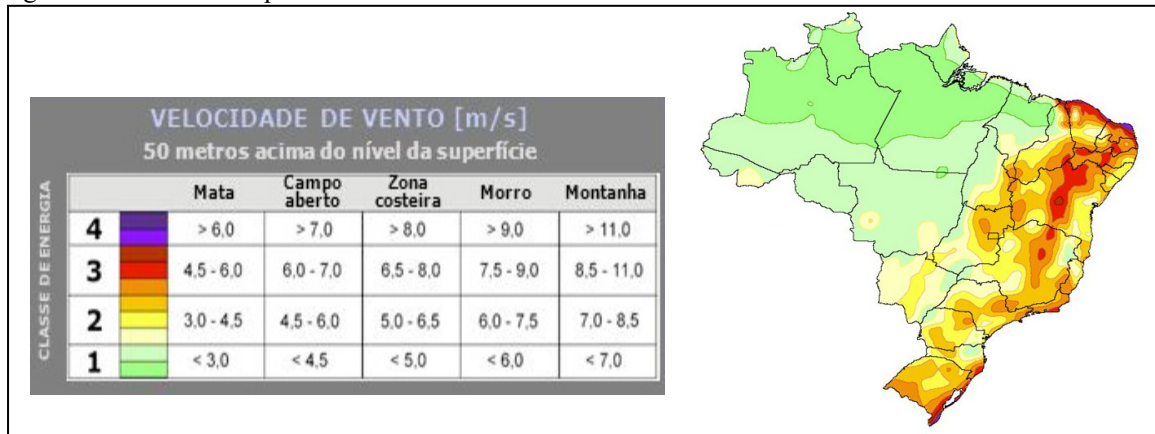
Esses fatores tiveram um papel importante na redução dos custos da energia eólica. A produção das turbinas eólicas tornou-se mais barata, e as turbinas mais eficientes e mais confiáveis. As máquinas progressivamente maiores trouxeram economias significativas em escala. O custo de uma máquina de 500 kW é menos de 5 vezes o custo de uma máquina 100 kW e os custos de aterramento, conexões elétricas, instalação e manutenção aumentam frequentemente pouco com o aumento do tamanho e da capacidade da turbina. Todos esses fatores resultaram em uma queda rápida e sustentada no custo da produção da energia elétrica através de turbinas eólicas.

Para o mundo, em 2050, com hipóteses de 15% de eólica (7.300 TWh) na geração total, e fator de capacidade de 32%, mostra que a capacidade instalada pode chegar a 2.600 GW, com expansão média anual de 75 GW entre 2040 e 2050 (SPE/MME, 2016).

Uma grande vantagem das centrais eólicas em relação às usinas hidroelétricas é que quase toda a área ocupada pela central eólica pode ser utilizada (para agricultura, pecuária, etc.) ou preservada como *habitat* natural. Apesar de todas as vantagens, a implantação de usinas eólicas apresenta alguns problemas, tais como: o custo inicial das turbinas, que ainda é maior do que o das energias convencionais; problemas ambientais advindos do barulho produzido e matança de pássaros; a incerteza da força do vento no decorrer do dia, que pode causar problemas na entrega de energia elétrica.

No Brasil, o estado do Ceará destaca-se por ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico. Segundo análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do país, como podem ser vistas na Figura 3, existe a possibilidade de que as usinas eólicas produzam eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas.

Figura 3 – Panorama do potencial eólico brasileiro.



Fonte: ANEEL (2003)

2.2 Energia Solar

Continuando com os outros tipos de energias renováveis, temos o aproveitamento da energia gerada pelo Sol, como pode ser vista na Figura 4, sendo uma das alternativas energéticas mais promissoras para o futuro. O mercado da energia solar tem crescido rapidamente, e os custos caído drasticamente. No entanto, a capacidade total instalada é menor que a eólica. Esse tipo de energia tem vantagens em relação às outras formas de geração, como por exemplo: não é poluente, não influi no efeito estufa, não precisa de turbinas ou geradores para a produção de energia elétrica.

Figura 4 – Energia solar.



Fonte: BLUESOL EDUCACIONAL (2015)

A energia solar fotovoltaica é obtida pela conversão direta da luz em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão. O desenvolvimento da tecnologia deu-se inicialmente motivado pela aplicação espacial. Com a crise do petróleo na década de 70, aumentou-se o interesse nesse tipo de geração para suprir o fornecimento de energia elétrica. Um grande desafio era, porém, o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$ 600/W para o programa espacial. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço tem se reduzido ao longo dos anos podendo ser encontrado hoje, para grandes escalas, um custo médio de US\$ 0,30/W (Portal Solar, 2016).

A tecnologia fotovoltaica (FV) conquistou seu espaço a tal ponto que a capacidade total instalada desse tipo de energia no mundo superou os 234 GW em 2015. O valor seria suficiente para produzir pelo menos 253 TWh de eletricidade por ano, resultando num fator de capacidade médio de 13,9% (SPE/MME, 2016).

Os cinco primeiros países em potência instalada respondem por 68% do total mundial. Em 2015, a China (1º) e os Estados Unidos (2º) superaram a Alemanha na geração. Em 2018, o Brasil deverá estar entre os 20 países maiores geradores de energia solar, ao se considerar a operação da potência já contratada, de 2,6 GW. Em termos de área geográfica, os 234 GW de 2015, correspondem a 1.635 km² de painéis solares, ou um quadrado de 40,4 km de lado, considerando 143 W/m² (eficiência de 15% de absorção solar) (SPE/MME, 2016).

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações.

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, nos quais em geral utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia, como por exemplo, através de baterias ou também na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento; sistemas híbridos, que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. Em geral, esses sistemas são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários; e os sistemas interligados à rede, que utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado.

As facilidades de um sistema fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de

manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica. O sistema fotovoltaico apresenta, porém, algumas desvantagens, como altos custos iniciais, que embora já tenham sofrido reduções, ainda são altos; e também a necessidade de grandes espaços para a implantação.

Em 18/07/2016, o Brasil contava com 51,1 MW de potência instalada de geração solar, correspondentes a 3.851 instalações. Em oito meses o número de instalações triplicou no Brasil.

Na Geração Distribuída, com potência de 28,1 MW, 80% das instalações são residenciais, com média de 4,6 kW/consumidor. Indústria, serviços e agro ficam com 20% das instalações e média de 18,7 kW. Considerando um indicador médio de 143 W/m², a potência instalada solar registrada em julho de 2016, equivale a um quadrado de 600 metros de lado. A geração estimada é de 67 GWh, ou 0,011% da demanda total de energia elétrica do Brasil de 2015 (SPE/MME, 2016).

2.3 Energia Maremotriz

Dando continuidade com as energias renováveis temos a maremotriz que é um tipo de geração também classificada como limpa e autosustentável. Encontra-se em fase de pesquisas e, portanto, não é ainda um recurso muito explorado. Comparado com a eólica e solar, a energia dos oceanos está ainda na sua infância. O recurso potencial desse tipo de geração é muito grande, pois as máquinas das usinas maremotrizes são tipicamente capazes de converter 60 a 80% da energia gerada em potência útil.

As usinas maremotrizes aproveitam as variações de nível entre as marés. É necessária a construção de uma barragem. Quando a maré enche a água é represada, e quando baixa a água sai, movimentando uma turbina diretamente ligada a um sistema de conversão, e assim gerando eletricidade.

Essa forma de geração de energia é utilizada principalmente no Japão, na Inglaterra e no Havaí, além da França - onde foi construída a primeira usina maremotriz do mundo, em La Rance, em 1966. Essa usina está em funcionamento desde 1966 e produz cerca de 550 GWh anualmente. O governo da Nova Escócia, do Canadá, já construiu uma usina de teste, no interior da Baía de Annapolis Royal, que tem a capacidade geradora de 20.000 kWh.

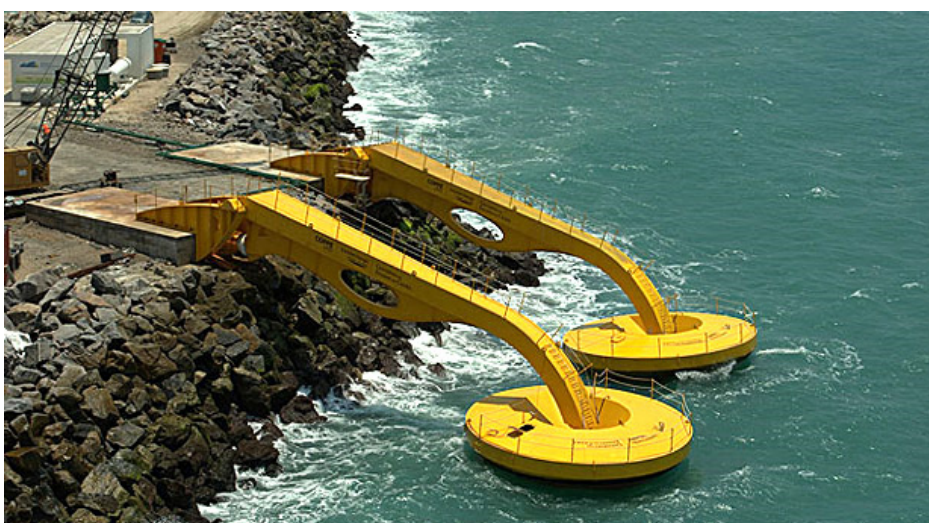
No Brasil, há regiões com aptidão para o aproveitamento desse tipo de energia, como por exemplo, no litoral Maranhense onde a amplitude dos níveis de maré pode chegar aos 8m.

Apesar disso, ainda não há qualquer usina maremotriz em funcionamento no Brasil.

Uma aplicação piloto, como pode ser vista na Figura 5, no porto de Pecém (CE) (a primeira da América Latina), utiliza do mar, outra fonte de energia: o movimento das ondas. Neste piloto, o movimento oscilatório de flutuadores e braços mecânicos que acompanham as ondas, pressuriza um tanque com água, que é projetada sobre as pás de uma turbina a uma pressão entre 200 m e 400 m de coluna d'água.

As usinas maremotrizes poderão ser uma opção para o futuro. Existem, porém, desvantagens na sua construção. É preciso analisar a viabilidade econômica desse tipo de geração, afinal para construir uma usina maremotriz é necessário todo o investimento feito para a instalação de uma hidrelétrica, como barragens, comportas e turbinas, porém, o rendimento da maremotriz é menor, por depender do ciclo das marés. Um outro problema é que os equipamentos utilizados devem ser fabricados com materiais especiais resistentes à corrosão, pois os mesmos estarão em contato com a água salgada. As instalações não podem interferir na navegação e têm que ser robustas para resistir as tempestades e ao mesmo tempo serem suficientemente sensíveis para ser possível obter energia de ondas de amplitudes variáveis. Tudo isso encarece bastante a implantação desse tipo de unidade geradora. Há também o problema da limitação da implantação, pois esta não pode ser feita em qualquer local. Existem ainda os riscos ambientais. A instalação desse tipo de usina pode modificar a qualidade da água e a cadeia alimentar de aves, peixes e invertebrados.

Figura 5 – Energia maremotriz.



Fonte: DUNIVERSO (2014)

2.4 Energia de Biomassa

Prosseguindo com as energias renováveis finalizamos com a biomassa que é constituída por matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. É uma fonte de energia não poluente. Pode ser obtida de diversas fontes, como resíduos de madeira, biogás e outros combustíveis, resíduos agro-industriais, resíduos sólidos urbanos, resíduos rurais, logo abaixo, na Figura 6, uma usina de biomassa.

Figura 6 – Energia de biomassa.



Fonte: AGENDAA (2015)

Vários fatores tornam a biomassa uma opção atrativa para geração de energia. Ela é uma fonte renovável e não contribui para o aumento do efeito estufa, pois a quantidade de CO₂ liberada para a atmosfera durante o processo de combustão é a mesma que seria liberada em sua decomposição. Sua baixa concentração de enxofre significa que a combustão da biomassa é menos acidificante que a do carvão, por exemplo. Também, as cinzas do consumo de biomassa, que têm uma baixa concentração de metais pesados, podem ser recicladas. A produção de energia elétrica a partir da biomassa tem sido defendida como uma importante opção para os países em desenvolvimento e também para os países da Comunidade Econômica Européia.

De acordo com dados da Associação Mundial de Bioenergia (WBA, 2015; WBA, 2014),

entre 2000 e 2012, a geração elétrica a biomassa cresceu 140% no mundo, chegando em 439 TWh. Nos anos de 2013 e 2014, segundo dados do relatório REN21 (2015), a geração a biomassa foi de 396 TWh e 433 TWh, respectivamente, mostrando uma redução seguida de retomada da tendência de crescimento. Ainda segundo este mesmo relatório, a potência instalada de geração elétrica a biomassa em 2014 era de 93 GW, o que correspondia a 14% da capacidade renovável total.

A principal biomassa empregada para geração elétrica no Brasil é o bagaço de cana. Sua participação tem sido crescente no cenário nacional, decorrente da pujante indústria de etanol e açúcar estabelecida em solo nacional. Historicamente, uma das políticas de maior impacto para a introdução dos biocombustíveis no mercado brasileiro foi o Programa Nacional de Álcool (Proálcool), em 1975. Com ele, a indústria sucroenergética nacional foi consolidada e ampliada, tornando-se referência internacional. O Proálcool é considerado um programa pioneiro de biocombustíveis, e teve como principal objetivo produzir um combustível alternativo nacional, já que, após os choques do petróleo em 1973 e 1979, este produto e seus derivados, tiveram um considerável aumento de preço, impactando fortemente o balanço de pagamentos. (EPE, 2015).

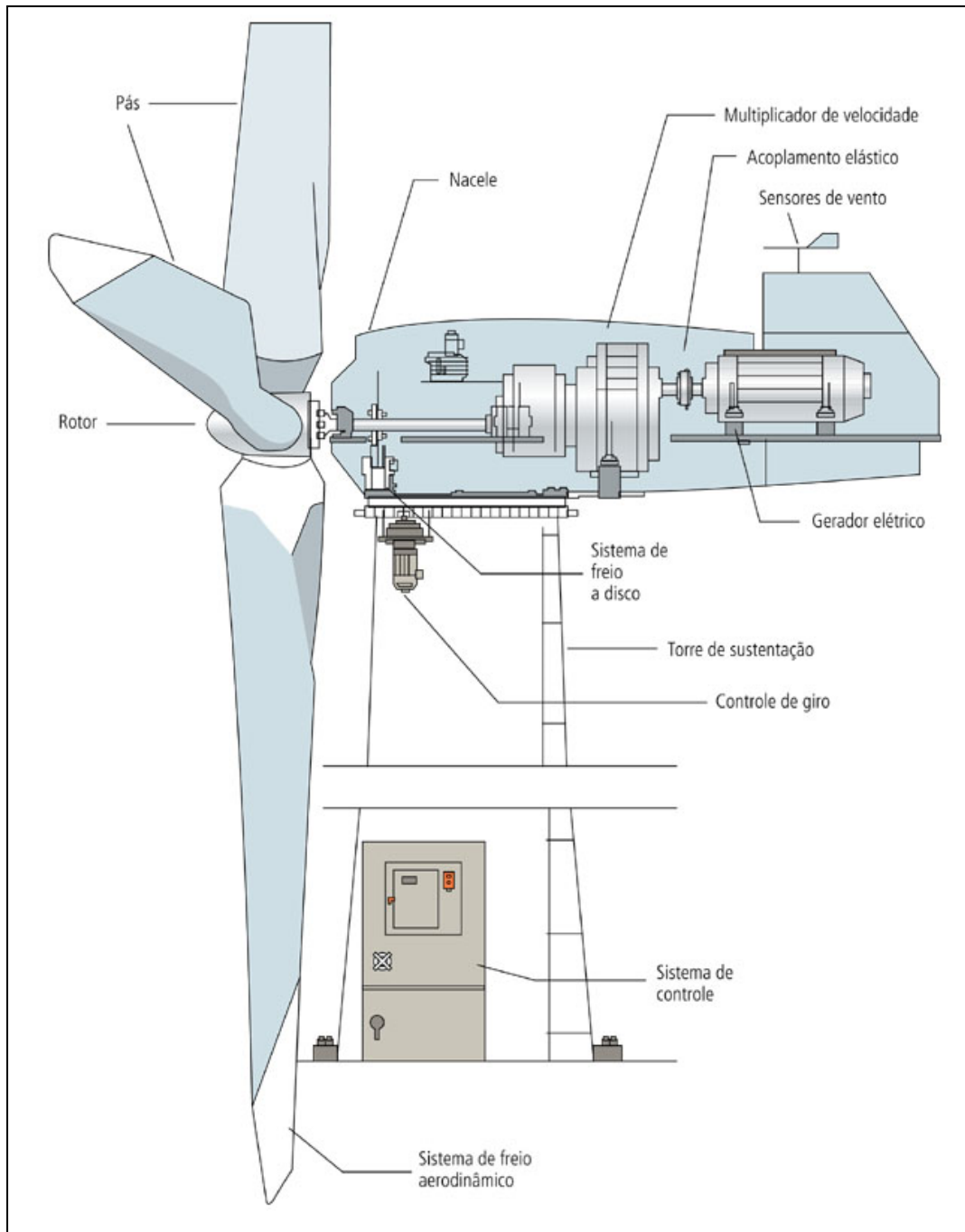
No Brasil, a bioeletricidade é obtida principalmente através da cogeração (processo que permite a geração combinada de energia elétrica e de energia térmica (calor e/ou frio), sendo ambas posteriormente utilizadas) em unidades dos segmentos industriais sucroenergético e, em menor escala, de papel e celulose, tendo como fonte a lixívia.

Atualmente, 517 empreendimentos termelétricos a biomassa estão em operação no País, somando uma potência instalada de quase 14 GW. A biomassa da cana, essencialmente bagaço, é o principal combustível de 394 termelétricas, com uma potência de aproximadamente 11 GW. Termelétricas a lixívia somam 17 empreendimentos, com 2,2 GW de potência (ANEEL, 2016).

2.5 Sistema de Microgeração Eólica

Os geradores eólicos são constituídos por diversos componentes e sistemas, que no seu conjunto permitem transformar a energia do vento em energia elétrica. Na produção da energia elétrica, as turbinas eólicas utilizam a energia cinética dos ventos. Estas podem ser classificadas mediante a orientação do eixo do seu rotor e muitas outras características.

Figura 7 – Gerador eólico.



Fonte: ANEEL (2003)

Geralmente os diferentes tipos de turbinas são classificados em dois grupos, turbinas de eixo horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*) e turbinas de eixo vertical (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*).

Nas turbinas de eixo horizontal, o sentido de orientação do rotor é normalmente o mesmo em que o vento se desloca, sendo o eixo de rotação paralelo ao solo. Possuem

normalmente três pás devido à superioridade em termos de eficiência em relação às restantes de uma ou duas pás. Isso é possível, pois as de três pás, Figura 8, distribuem melhor as tensões quando a máquina gira durante mudanças de direção do vento. Com esta vantagem, as turbinas de três pás são as mais modernas, consolidadas e são usadas no mundo todo, tanto em parques eólicos quanto em sistemas isolados, de baixa ou de alta potência.

Figura 8 – Turbina de eixo horizontal.



Fonte: ANEEL (2003)

A vantagem que mais contribui para o fato de o maior número de turbinas, que hoje se encontram instaladas serem de eixo horizontal, deve-se ao fato de possuírem uma torre geralmente metálica. Isto permite a instalação dos geradores em alturas superiores ao solo, onde normalmente a velocidade do vento é muito superior, ao contrário das de eixo vertical que são menos populares devido ao baixo aproveitamento da energia do vento, mas foram muito usadas no passado por apresentarem vantagens específicas em sua estrutura. Hoje elas restringem-se aos sistemas de baixa potência e a instalações em áreas urbanas devido à produção de baixo ruído e a sua capacidade única de aproveitar ventos turbulentos.

As turbinas de eixo vertical, como pode ser vista na Figura 9, têm o eixo de rotação perpendicular em relação ao solo e ao sentido em que o vento se desloca. Neste gênero de turbinas não são necessários sistemas ou mecanismos de orientação, pois o seu tipo de arquitetura permite-lhe captar ventos em qualquer direção, possibilitando também a instalação dos geradores próximos do solo, facilitando o acesso a estes para posterior manutenção.

Figura 9 – Turbina de eixo vertical.



Fonte: DINÂMICA AMBIENTAL (2015)

Os sistemas eólicos são divididos em dois grandes grupos, sendo o primeiro o dos sistemas de grande potência e o segundo, os de baixa potência (microgeradores). O que difere um do outro, além da capacidade de geração, é o fato de que os mesmos são compostos por diferentes componentes, apesar de que, de modo geral, ambos são formados pelos mesmos blocos.

Como o próprio nome indica, os microgeradores eólicos são caracterizados por possuírem uma potência mais baixa e terem dimensões mais reduzidas em relação aos geradores eólicos de grande porte. As aplicações desses equipamentos podem ser para uso residencial, pequenas empresas ou pequenos parques eólicos.

Nos microgeradores eólicos não é necessário a utilização de uma caixa de velocidades, pois a velocidade necessária para o gerador elétrico produzir energia é semelhante à velocidade

de rotação do rotor do microgerador.

A grande maioria dos microgeradores eólicos, para aproveitar o máximo de energia do vento, utiliza uma cauda para poder deslocar-se no sentido de orientação do vento.

De uma forma geral, todos os outros componentes de um microgerador eólico são semelhantes aos de um gerador eólico de grande porte.

Nas Figuras 10 e 11 é possível visualizar a diferença das dimensões de uma microgerador eólico, colocado em cima do telhado e um gerador eólico que necessita de um guindaste para ser montado.

Figura 10 – Microgerador eólico.



Fonte: ECOVILARESORT (2012)

Figura 11 – Gerador eólico de grande porte.



Fonte: TOMÉ (2016)

Em seguida são apresentados diferentes empresas internacionais que produzem microgeradores eólicos, sendo apresentados alguns modelos e algumas características desses modelos, como *Cut-in Wind speed* (velocidade do vento para a qual o microgerador começa a fornecer energia), *Cut-out Wind speed* (velocidade do vento para a qual o dispositivo de segurança do microgerador é ativado), velocidade nominal do vento (velocidade do vento necessária para o microgerador alcançar a potência nominal), entre outras.

Microgeradores *SAWT*

Xangai Aeolus Windpower Technology Co., Ltd. (Sawt), é uma empresa chinesa, sediada em Xangai, que produz microgeradores eólicos de eixo vertical, com potências que vão desde os 200W até aos 10kW. As características do Modelo PK-10 são as seguintes:

- Tipo de eixo - Vertical;
- Diâmetro do rotor - 600 cm;
- Comprimento das pás - 620 cm;
- Gama de velocidades de vento de operação - de 4 a 25 m/s;
- Velocidade máxima do vento de segurança - 55 m/s;
- Potência nominal - 10 kW;
- Tensão de saída - 110 V/CC;

Microgeradores *African Windpower*

A empresa Sul-Africana, *African Windpower*, produz Microgeradores eólicos de eixo horizontal, os modelos disponíveis são o AWP 3.6 e uma evolução deste modelo o AWP 3.7 com as seguintes características:

- Tipo de eixo - Horizontal;
- Diâmetro do rotor - 3,7 m;
- Número de pás - 3;
- *Cut-in Wind Speed* - 3 m/s;
- *Cut-out Wind Speed* - Não tem (o microgerador suporta velocidades do vento até ao valor da velocidade de segurança);
- Velocidade máxima do vento de segurança - 60 m/s;
- Velocidade máxima do rotor - 500 rpm;
- Velocidade nominal do vento - 12 m/s;
- Potência nominal - 2 kW;
- Tensão de saída - 12V, 24V, 36V, 48V, 96V, 110/220V, CA/0-125 Hz.

Microgeradores *Ampair*

A *Ampair* é uma empresa do Reino Unido que produz sistemas de energia renovável a cerca de quarenta anos, os modelos de microgeradores produzidos vão dos 100W de potência nominal até aos 6000W, as características do microgerador *Ampair* 6000 são as seguintes:

- Tipo de eixo - Horizontal;
- Diâmetro do rotor - 5,5 m;
- Número de pás - 3;
- *Cut-in Wind Speed* - 3,5 m/s;
- *Cut-out Wind Speed* - 15 - 35 m/s;
- Velocidade máxima do vento de segurança - 70 m/s;
- Velocidade do rotor - 70 - 250 rpm;
- Tipo de gerador elétrico - Gerador Síncrono de Imãs Permanentes;
- Potência nominal - 6000 W;
- Tensão de saída - 230V CA/50 Hz, 208/240/277V CA/60Hz, 48V CC;

Microgeradores *Wind Turbine Industries Corp.*

A Empresa *Wind Turbine Industries Corp.* está sediada nos Estados Unidos da América,

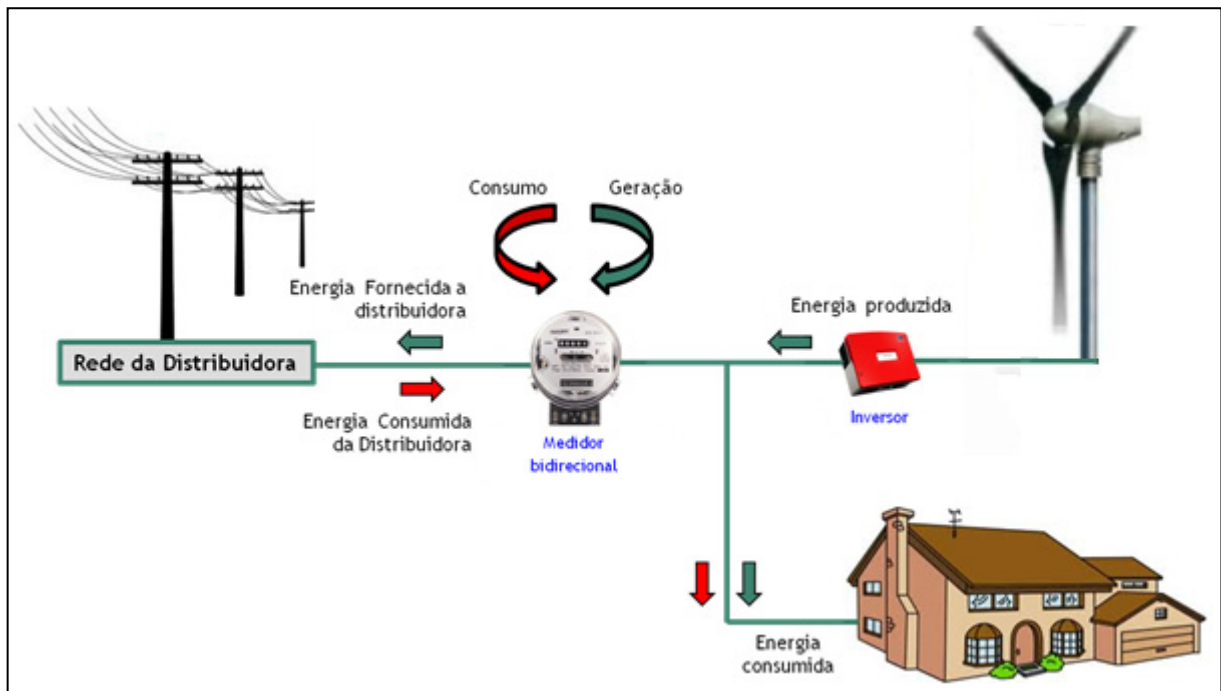
e é o único fabricante de sistemas eólicos *Jacobs*, desde 1986. O microgerador *Jacobs* tem as seguintes características técnicas:

- Tipo de eixo - Horizontal;
- Diâmetro do rotor - 10 m;
- Número de pás - 3;
- *Cut-in Wind Speed* - 3,4 m/s;
- *Cut-out Wind Speed* - Não tem (o microgerador suporta velocidades do vento até ao valor da velocidade de segurança);
- Velocidade nominal do vento - 12 m/s;
- Velocidade máxima do vento de segurança - 54 m/s;
- Velocidade nominal do rotor - 175 rpm;
- Tipo de gerador elétrico - Gerador Síncrono sem escovas com excitação externa;
- Potência nominal - 20 kW;

Agora será descrito os componentes necessários para se implementar uma microgeração de energia eólica a um consumidor conectado à rede elétrica de distribuição.

Temos na Figura 12 uma ilustração do sistema proposto.

Figura 12 – Sistema de microgeração eólica conectada à rede de distribuição.



Fonte: VIRIDIAN (2011)

Começando pelo inversor, como visto na Figura 13, que é o componente responsável pela conversão de energia elétrica produzida no aerogerador, fazendo a ligação com a rede de distribuição. Ele pode ser considerado o coração de um sistema de microgeração conectado à rede.

O inversor deve dissipar o mínimo de potência, evitando as perdas e deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica.

Os inversores usam um mecanismo de chaveamento para alternar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa. Transistores de potência, retificadores controlados de silício (SCRs) e, mais recentemente, os IGBTs – *Insulated Gate Bipolar Transistors* são tipicamente usados como chaves semicondutoras.

Figura 13 – Inversor de frequência.



Fonte: ENERGIAPURA (2016)

Inversores monofásicos são geralmente adequados para aplicações de baixa potência (5kW). Acima de 5kW os inversores trifásicos são mais comuns. A escolha de um inversor interfere no desempenho, confiabilidade e custo de um sistema de microgeração eólico. Quando estão no circuito, adicionam complexidade ao mesmo, mas possuem os atrativos de facilitar a instalação elétrica e permitir o uso de acessórios convencionais.

Um outro componente do sistema de microgeração para se conectar à rede elétrica é denominado de medidor bidirecional (ou o sistema utilizando dois medidores, um para medir o consumo e o outro para medir o que foi gerado). Na Figura 14 temos um modelo de medidor bidirecional.

Figura 14 – Medidor bidirecional.



Fonte: LANDISGYR (2016)

2.5.1 Vantagens e Desvantagens

Existem vantagens e desvantagens de se utilizar um sistema de microgeração eólico conectado à rede de distribuição elétrica, serão apresentadas as principais:

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 mau estudo de mapeamento, previsão e medição dos ventos no local não se tornam fontes confiáveis;
- Possuem custo de investimento elevado;
- Poluição visual;
- Poluição sonora.

De uma maneira geral, seja pelo caráter não poluente, seja pelo fato de o vento ser uma fonte inesgotável de energia, a energia eólica possui uma grande aceitação da sociedade. Mas, como toda a forma de produção de energia elétrica, a energia eólica possui também impactos

sócio-ambientais os quais devem ser considerados. Entre estes impactos citam-se:

- Colisão de aves;
- Interferências eletromagnéticas e;
- Segurança.

2.5.2 Viabilidades

A viabilidade de um projeto para um sistema de microgeração de energia eólica depende de alguns fatores tais como:

- Incidência de velocidade dos ventos na região;
- Tipos de topografia da região;
- Altitude da região;
- Condições climáticas;
- Custos de mão de obra e material.

No Brasil encontram-se várias regiões com um excelente potencial eólico com relação a magnitude dos ventos, sendo as regiões Nordeste e Sul do país com os maiores índices.

CAPÍTULO 3

3 A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é definida pelos produtores de energia mundiais como produção energética próxima ao consumo. Trata-se de uma forma de geração de energia bastante utilizada desde o início da industrialização até a primeira metade do século XX, período que a energia utilizada pela indústria era praticamente toda gerada localmente. Recentemente ganhou novamente destaque pelos grupos de pesquisa.

Por volta da década de 40, a geração em centrais de grande porte ficou mais barata, diminuindo a importância pela geração distribuída e, por consequência, limitou o incentivo ao desenvolvimento tecnológico para esse tipo de geração. Desse modo, o fornecimento de energia elétrica é disponibilizado quase que totalmente pela construção de grandes usinas geradoras. Contudo, como essas usinas estão longes dos centros de consumo, torna-se necessário associar extensas linhas de transmissão e sistemas complexos de distribuição para fornecer energia aos consumidores finais.

A utilização das grandes usinas de energia resolveu o equacionamento entre oferta e demanda até o fim do século XX, quando fatores forçaram a busca por formas diferentes de aumentar a produção de energia. Os principais fatores que alavancaram essa busca foram: restrições ambientais, dificuldades para a instalação de grandes empreendimentos energéticos, a crise do petróleo, prazos longos para construção dessas usinas, fortes impactos ambientais e o grande endividamento que resulta da instalação de uma grande usina.

Dentro desse contexto que a geração de energia através de produtores de pequeno porte e com baixo prejuízo ambiental ganham atenção, mostrando surgir o interesse pela geração distribuída.

Geração distribuída é geralmente determinada como geração de energia elétrica através de fontes distribuídas de energia, realizada próxima aos locais de consumo, ou seja, não necessita de transporte de energia por meio de uma rede de transmissão.

A geração distribuída constitui-se tipicamente de geradores menores ou geração de energia renovável, como a eólica, a solar, pequenas hidrelétricas. Ela inclui também:

- Cogeneradores;

- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Pequenas Centrais Termoelétricas.

Considera-se geração distribuída pequenas centrais elétricas, com até 30 MW de potência, sejam essas de qualquer tipo, não havendo restrição também quanto à classificação do proprietário (auto-produtor, produtor independente, concessionária, ou outra modalidade).

No Brasil, a utilização da geração distribuída estabelece um marco importante em seu desenvolvimento quando é colocada, na Lei nº 10.848/04, como um possível meio de geração de energia. No artigo 14 do Decreto nº 5.163/04 considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica advindos de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador. A exceção se faz às hidrelétricas com capacidade instalada superior a 30 MW e às termelétricas, inclusive de cogeração, com eficiência inferior a 75 %.

3.1 Vantagens da Geração Distribuída

A geração distribuída pode trazer um número significativo de vantagens em relação à geração centralizada, mas a extensão da vantagem depende de onde o gerador é conectado na rede. Pode-se citar:

- Os geradores distribuídos entregam energia aos consumidores de maneira mais direta do que geradores centralizados. Assim, é reduzida a distância que a energia circula e conseqüentemente são reduzidas as perdas elétricas. Além disso, a geração distribuída permite o atendimento da demanda crescente de forma rápida, já que a construção de grandes usinas hidrelétricas, por exemplo, que é o modelo de geração mais usado no Brasil, é um processo demorado;
- Benefícios ambientais: se menos energia for perdida na transmissão e na distribuição, então menos tem que ser gerado. Além disso, com a conexão da geração distribuída tem-se potencialmente uma redução do consumo de energia primária, o que permite a diminuição da importação de combustíveis fósseis e a redução das emissões de dióxido de carbono;
- Benefícios econômicos: usar a rede da transmissão da alta tensão gera custos. Estando a geração distribuída localizada próxima ao local de consumo, ela permite uma menor utilização da rede de transmissão, e assim os custos são diminuídos. Aproximadamente 2%

da energia é perdida durante a transmissão na rede elétrica. Isso adiciona conseqüentemente em média 2% ao preço da energia elétrica.

Com o aumento do interesse pela geração distribuída, aumenta-se também o interesse no estudo de diferentes fontes de energia renovável. As principais dessas fontes foram discutidas neste trabalho no capítulo anterior.

3.2 Critérios Gerais Sobre Conexão da Geração Distribuída

Em diversos países estão sendo estudados requisitos específicos para conexão de geração distribuída às redes elétricas. Em termos gerais, o *IEEE Working Group SCC21 P1547* publicou uma recomendação para a interconexão de geração distribuída, o *Standard for Distributed resources Interconnected with Electric Power Systems*. O documento ainda está em fase de aperfeiçoamento, porém já trata de alguns aspectos elétricos e testes que devem ser observados para a implantação de geração distribuída, tais como regulação de tensão, sincronização, proteção, qualidade de energia, ilhamento, testes necessários para conexão da geração à rede, comissionamento, dentre outros.

Em alguns países existem algumas normas específicas. No Reino Unido, por exemplo, criou-se o *Engineering Recommendation G.59/1* que trata das questões relacionadas à conexão da geração distribuída na rede elétrica. Na Califórnia foi criado o *Distributed Generation Interconnection Rules*. A maioria dos países não apresenta nenhuma norma especial, e essas normas em geral dependem do tipo de geração.

No Brasil, a geração distribuída é normalmente implementada por pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia gerada, por sua conta e risco (produtor independente); e por pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para gerar energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo (autoprodutor). Esta definição foi apresentada no decreto nº. 2003 de 10 de setembro de 1996, que trata da concessão da geração distribuída.

Na realização de uma conexão de sistemas de geração de energia às redes de distribuição existentes, torna-se necessária uma avaliação dos impactos técnicos que podem ocorrer na operação do sistema de distribuição, uma vez que essas redes não foram originalmente projetadas para suportar uma significativa inserção de unidades geradoras.

3.3 Regulamentação e Legislação para a Microgeração

No ano de 2015, através da Resolução Normativa nº 687 da ANEEL, o governo brasileiro regulamentou que as distribuidoras de energia elétrica precisavam adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar das ligações no sistema da minigeração e microgeração distribuída. Outrora, o total aproveitamento do potencial de energia dos sistemas de geração distribuída apresentava vários obstáculos de natureza regulatória.

O sistema de compensação apresentado nessa resolução é o sistema no qual a energia gerada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ). Para fins desta compensação, a energia ativa gerada no sistema de distribuição pela unidade consumidora, será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de sessenta meses.

O consumo de energia elétrica ativa a ser faturado é a diferença entre a energia consumida e a energia gerada. Portanto, o excedente de energia produzido pelo sistema de geração distribuída pode ser fornecido a outros consumidores da rede da concessionária. Esse sistema é muito comum em países onde os produtores dessa energia alternativa vendem a concessionária local o excedente de geração e compram de volta quando o consumo aumenta.

3.3.1 Resolução Normativa nº687 da ANEEL

A Resolução Normativa nº 687/2015, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, visando a reduzir as barreiras regulatórias existentes para conexão de geração de pequeno porte na rede de distribuição. A resolução classifica geração distribuída da seguinte forma:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada, conectada à rede elétrica de distribuição por meio de

instalações de unidades consumidoras;

- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para fontes com base em energia hídrica, ou 5 MW para as demais fontes.

3.3.2 *PRODIST*

O PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST é composto por 9 Módulos, são eles:

- Módulo 1 – Introdução
- Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição
- Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- Módulo 5 – Sistemas de Medição
- Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações
- Módulo 7 – Cálculos de Perdas na Distribuição
- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica
- Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos

No Brasil, a ANEEL, do módulo 3 do PRODIST “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Acesso ao Sistema de Distribuição”, estabelece os critérios para a conexão da geração distribuída no sistema de distribuição. Tais critérios podem ser encontrados nas seções 3.3 e 3.7 do módulo 3 do PRODIST.

Na Tabela 1 descreve-se as proteções mínimas para cada faixa de potência.

Tabela 1 – Requisitos mínimos em função da potência instalada.

Equipamento	Potência Instalada		
	Menor ou igual 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim

Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Não	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

Fonte: ANEEL (2015)

CAPÍTULO 4

4 ESTUDO DE CASO

Agora será feita através de uma simulação a análise de um caso de aplicação do sistema de microgeração eólica, escolhido de acordo com as possibilidades de implementação. Para o sistema a ser desenvolvido, são especificados os materiais que serão utilizados, e a forma com que eles alimentarão a residência. Uma análise econômica é apresentada para verificar o tempo de retorno do investimento do sistema proposto.

4.1 Análise da Viabilidade do Uso de uma Microgeração Eólica em uma Unidade Consumidora Residencial

O objetivo desse capítulo é analisar a viabilidade do uso de um sistema de microgeração eólica em unidade consumidora residencial de baixo consumo na cidade de Fortaleza, através de uma análise de atratividade financeira do investimento.

Os principais fatores que interferem na análise:

- Despesas com avaliação do potencial eólico do local;
- Custos de aquisição dos equipamentos;
- Custos de instalação;
- Custos com manutenção e operação.

Será considerada uma unidade consumidora residencial com consumo médio em torno de 100kWh/mês, que esteja conectada à rede de distribuição secundária de energia elétrica.

O consumo de energia elétrica é simulado pelas cargas que compõem a residência. As cargas são as seguintes:

- Uma bomba d'água;
- Dez lâmpadas;
- Um aparelho de som;
- Um televisor;
- Um ventilador;
- Um ferro de passar roupa;

- Um micro-ondas;
- Dois carregadores de celular.
- Um receptor de antena parabólica e um refrigerador.

Na Tabela 2 estão contidas todas as potências e duração de funcionamento das cargas da residência.

Tabela 2 – Consumo da residência.

Carga	Potência (W)	Quantidade	Uso (h/dia)	Consumo diário (Wh)	Consumo mensal (kWh)
Bomba d'água	80	1	3	3220	96
Lâmpada	11	10	5		
Aparelho de som	50	1	3		
Televisor	90	1	4		
Carregador de celular	20	2	2		
Ventilador	30	1	3		
Ferro de passar roupa	600	1	0,2		
Receptor	10	1	3		
Refrigerador	60	1	24		
Micro-ondas	800	1	0,2		

Fonte: Elaborada pelo autor

Os geradores utilizados para essas aplicações são projetados para funcionar em velocidades entre 4 e 30 m/s. Acima desta faixa os componentes entram em sobrecarga e abaixo dela não é viável gerar energia.

O modelo utilizado nessa aplicação é o aerogerador Gerar246-1kW produzido pela Enersud que possui as seguintes características:

- Robustez mecânica;
- Eficiência na geração de energia;
- Baixo nível de ruído;
- Sistema de segurança extremamente confiável.

Em locais de vento apropriado são capazes de sustentar uma residência de porte médio excluindo apenas aparelhos de elevado consumo de energia como o chuveiro elétrico.

As características técnicas desse modelo:

- Diâmetro da hélice – 2,46 m
- Potência a 12 m/s – 1000 Watt
- Rpm a 12 m/s – 630 rpm
- Número de pás – 3
- Tipo de pás – torcida, (5 aerofólios)
- Velocidade de partida – 2,2 m/s
- Torque de partida – 0,3 Nm
- Controle de velocidade – *stall*
- Proteção contra altas velocidades – *Active Stall* (Controle de Passo)
- Sistema magnético – neodímio (ímã permanente)
- Sistema elétrico – trifásico
- Tensão de saída – 12/24/48/300 volts
- Alternador – Fluxo Axial (encapsulado em epóxi, resistente a água)
- Escovas da cabeça giratória – Redundante (duas por fase)
- Peso total (alternador + hélice + cab. Rot.) – 32 Kg
- Material Anti Corrosão – Alumínio / Inox / Mat. Galvanizado
- Balanceamento – Dinâmico (confirmação após pintura)
- Características Técnicas do Controlador de Carga

Principais Funções:

- Controle de carregamento de baterias com booster para aproveitamento das baixas velocidades de vento, acima de 3m/s.
- Tensão de saída – até 300 volts
- Material – Alumínio

O custo de aquisição de todo material utilizado na simulação está descrito na Tabela 3.

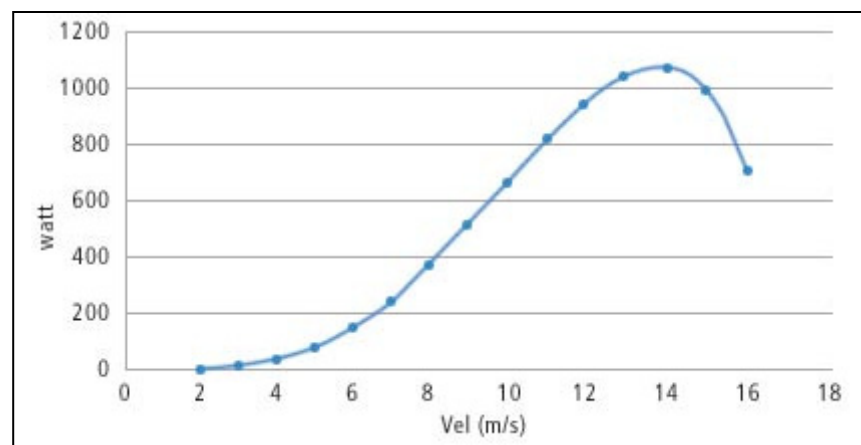
Tabela 3 – Custo do material.

ITENS	QUANTIDADE	PREÇO/UNIDADE (R\$)
Aerogerador (Enersud)	1	8.000,00
Kit torre (Enersud)	1	1.400,00
Inversor (Comércio Local)	1	5.400,00
Medidor Digital	1	600,00
Outros (Comércio Local)	1	800,00
Total		16.200,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Levando em consideração as perdas inerentes ao processo, a altitude do relevo de 12m e a velocidade média do vento de 6m/s em Fortaleza (FUNCEME, 2015), o aerogerador utilizado, de acordo com sua curva de potência (Figura 15), fornecerá de forma contínua apenas 20% da sua potência nominal.

Figura 15 – Curva de potência Gerar246.



Fonte: ENERSUD (2015)

Logo: $200W \times 720h/mês = 144kWh/mês$, que é a produção estimada mensal deste aerogerador.

Para a avaliação econômico-financeira de sistemas eólicos de geração distribuída sob a ótica do consumidor, são utilizados conceitos de matemática financeira como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback*.

Agora será feita uma análise simplificada de retorno utilizando um cálculo do *payback* simples.

O método do *payback* (Período de Retorno) tem como pressuposto avaliar o tempo que o projeto demorará em retornar o total do investimento inicial. Quanto mais rápido o retorno, menor o *payback* e melhor o projeto. É o método que mostra o tempo que a investidor precisará para recuperar o capital investido por meio dos ganhos que o investimento proporcionará (CAVALCANTE, 1998).

Considera-se a seguinte situação:

- Aquisição: R\$ 16.200,00;
- Vida útil: 20 anos;
- Consumo médio mensal: 100 kWh;
- Tarifa baixa tensão (Coelce outubro/2016): R\$ 0,71803;
- Sem excedentes mensais de geração.

Obtém-se o seguinte *payback* simples:

$$\text{Valor do Consumo Anual} = 100\text{kWh} \times \text{R\$ } 0,71803 \times 12 = \text{R\$ } 861,64$$

$$\textit{Payback} \text{ Simples} = \text{Valor da Aquisição} / \text{Valor do Consumo Anual}$$

$$\textit{Payback} \text{ Simples} = \text{R\$ } 16.200,00 / \text{R\$ } 861,64$$

$$\textit{Payback} \text{ Simples} = \mathbf{19 \text{ anos}}$$

O método *payback* baseia-se no número de anos requeridos para se obter retorno sobre o investimento inicial. Ele não leva em consideração a dimensão do retorno. Por isso, utilizam-se também os outros dois métodos em conjunto.

O conceito do Valor Presente Líquido (VPL) consiste em levar todos os valores esperados, tanto de entrada como de saída, de um fluxo de caixa para a data zero deste fluxo utilizando-se como taxa de desconto a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). No dizer de Cavalcante (1998, p. 12), “[..]o Valor Presente Líquido (VPL) é a diferença entre o fluxo de entrada menos o fluxo de saída.

É válido ressaltar que o valor presente de uma quantia que existirá no futuro, é sempre menor que o valor original, pois este será descontado de uma taxa de juros. Neste estudo, a taxa de juros aplicada é de 7,9448% a.a (TMA), considerando que o custo de oportunidade de capital foi o rendimento anual da poupança de 2015, ou seja, essa é taxa pela qual eu consigo rendimento equivalente deixando o dinheiro na poupança. Além disso, considerou-se um aumento anual na taxa de energia elétrica de 5% ao ano.

Pelo critério do Valor Presente Líquido, para definir se um investimento deve ou não ser realizado, utilizando a TMA, caso o VPL seja negativo o investimento destruirá valor, portanto não deverá ser realizado. Caso o VPL seja positivo, o investimento gerará valor, e assim, deverá ser realizado. Porém, se o VPL for nulo é indiferente investir.

Para que o investimento seja viável financeiramente pelo método de análise VPL é necessário que os ganhos econômicos recebidos em todo o período de validade do projeto deslocados para o seu início por uma taxa de 7,9448% e somados, seja maior que o investimento total do projeto deslocado para o mesmo período de tempo. Caso isso não ocorra, o projeto não será viável. Fazendo os deslocamentos de todos os retornos anuais para a data inicial do investimento, obtém-se os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo do valor presente a uma taxa de atratividade de 7,9448% ao ano.

t	Ano	Valor do dinheiro no presente em 2016 (R\$)
1	2017	838,13
2	2018	815,27
...
19	2035	509,43
20	2036	495,54
Total		13.053,68

Fonte: Elaborada pelo autor

Obtém-se o seguinte VPL:

$$\text{VPL} = (\text{Soma de todos retornos anuais na data inicial}) - (\text{Valor do investimento})$$

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 13.053,68 - \text{R\$ } 16.200,00$$

$$\text{VPL} = - \text{R\$ } 3.146,32$$

Finalizando a análise com o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) que seria um método similar ao VPL, ou seja, utiliza a mesma lógica de cálculo, contudo apresenta os resultados em porcentagem e não em valores monetários. Segundo Cavalcante (1998, p. 9), “a Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de juros que iguala os fluxos de entrada e saída de dinheiro de um investimento em zero”. Ou seja, é o ganho, em percentual, que se obteve com o

investimento (se obteve ganho que pagou o capital investido e ainda gerou superávit). Uma vez calculado a TIR, esta deve ser comparada com a TMA adotada no projeto, considerando-se que:

a) $TIR > Taxa\ Mínima$: ($VPL > 0$) - O cliente estaria obtendo uma taxa de retorno maior que a taxa de retorno mínima exigida; aprovaria o projeto; b) $TIR = Taxa\ Mínima$: ($VPL = 0$) - O cliente estaria obtendo uma taxa de retorno exatamente igual à taxa de retorno mínima exigida; seria indiferente em relação ao projeto; e c) $TIR < Taxa\ Mínima$: ($VPL < 0$) - O cliente estaria obtendo uma taxa de retorno menor que a taxa de retorno mínima exigida; reprovava o projeto.

Pela análise da taxa interna de retorno, o valor calculado é de aproximadamente 6% para o investimento proposto. Como 6% é menor do que a TMA que é de 7,9448%, tem-se que o projeto, por esse método é economicamente inviável.

A Tabela 5 descreve um resumo dos resultados da simulação.

Tabela 5 – Resultado da simulação.

Indicador Financeiro	Valor
Payback	19 anos
VPL	– R\$ 3.146,32
TIR	6%

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Resultados

Pode-se verificar que o tempo de retorno é bem próximo da vida útil dos equipamentos, sendo assim considerado extenso. Lembrando que foram desprezados custos com análise de potencial e instalação. Mesmo que haja excedentes todos meses, não poderiam servir à unidade consumidora, a menos que a concessionária pagasse por eles.

Para consumidores de consumo relativamente baixo (100kWh/mês), a alternativa não se mostrou viável por apresentar tempo de retorno bastante próximo da vida útil dos equipamentos, um valor presente líquido negativo e a taxa interna de retorno menor que a taxa mínima de atratividade.

Em caso de valores de consumos maiores e empresas com filiais, o sistema de microgeração passa a ser mais interessante, pois o crédito de energia excedente pode ser melhor aproveitado.

Esse resultado desanimador está ligado, basicamente, a dois problemas: preço caro

e burocracia. Os fabricantes de equipamentos de microgeração reclamam ainda da falta de informação dos consumidores sobre os benefícios da tecnologia e da ausência de financiamento específico para estimular o interesse nos projetos.

Os estímulos a essa geração distribuída se justificam, segundo a norma da Aneel, pelos benefícios que a modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética brasileira.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado neste trabalho, os objetivos propostos inicialmente foram atendidos. Foi possível aprofundar os conhecimentos no desenvolvimento das energias renováveis onde a energia eólica tem vindo a revelar um papel cada vez mais significativo no crescimento das energias renováveis.

Foram apresentados os principais Sistemas para Microgeração de eletricidade, tendo como foco o Sistema de Microgeração Eólica, descrevendo-os através de texto citado, figuras, mapas e gráficos, suas funcionalidades, vantagens, desvantagens e viabilidades de cada sistema.

Pode-se concluir que os diferentes sistemas para obtenção da microgeração de eletricidade já são realidade em diversos países do mundo, onde há uma significativa redução dos gases poluidores da atmosfera. Esses sistemas também podem levar eletricidade a regiões que não possuem uma rede de distribuição próxima.

O sistema de microgeração eólica, abordado nesse trabalho, encontra-se em uma fase de crescimento bastante acentuado no mundo e no Brasil as regiões Sul e Nordeste são privilegiadas devido a qualidade dos ventos.

A geração distribuída de energia eólica pode se tornar uma alternativa no planejamento energético brasileiro. Por estar próximo do consumo, a energia gerada é injetada na rede de distribuição secundária, podendo ser consumida localmente, evitando perdas com a transmissão de energia elétrica. As vantagens da utilização da geração distribuída ressaltadas pelos avanços tecnológicos, tendem a propagar o seu emprego, contribuindo com o aumento da introdução da energia de fontes renováveis na matriz energética e a redução dos impactos ambientais. Essas condições são essenciais no desenvolvimento de cidades de contexto sustentável.

Ainda que a tendência de uso da geração distribuída seja crescente, conforme a cidade, poderá ser insuficiente para atender todo o aumento da demanda de energia e, sendo assim, não irá isentar acréscimos da geração centralizada, mas sim reduzir sua taxa de crescimento.

A partir da elaboração da Resolução Normativa nº 482 a grande maioria dos consumidores de energia elétrica no Brasil foram habilitados a gerar parte ou toda a energia consumida através da rede de distribuição abatendo assim os custos equivalentes do consumo de

energia elétrica. Essa resolução deve ser compreendida como um importante marco regulatório no que diz respeito ao acesso efetivo de pequenos produtores às redes de distribuição.

Para garantir o sucesso desse sistema de microgeração e torná-lo acessível serão necessários outros fatores além da Resolução 687/2015 da Aneel como subsídios do governo, políticas que incentivem o consumidor a buscá-lo, linhas de financiamento, incentivos fiscais, parcerias público-privadas, mobilização do setor de energia elétrica, entre outros.

Pela análise de atratividade financeira realizada, verifica-se que um dos fatores mais importantes para a viabilidade econômica do projeto é o custo de investimento inicial e pode ser determinante para o processo de tomada de decisão sobre investir ou não neste tipo de sistema.

Como se observa através do caso estudado, a viabilidade técnica foi obtida sem dificuldade. De fato, em grande parte do território nacional tem-se um potencial eólico favorável a instalação deste sistema de geração. Contudo, ainda não se encontra no Brasil, um cenário capaz de atrair o investimento neste tipo de projeto, pois a viabilidade econômica não foi alcançada, mas pelo aspecto social e ecológico é uma boa opção porque o sistema não polui durante seu uso, reduz as emissões de CO₂, reduz a dependência energética da sociedade face aos combustíveis fósseis, reduz as perdas por transmissão e distribuição de energia, assim como o investimento em linhas de transmissão e distribuição, entre outros.

Outro aspecto interessante que poderá ser abordado em estudos futuros é a utilização de outras fontes de energias renováveis para assim ser feito uma análise da viabilidade econômica interligando esse sistema de microgeração a rede de distribuição.

REFERÊNCIAS

AGENDAA. **Alagoas Já Está Entre os 10 Maiores Produtores de Energia de Biomassa do País.** Disponível em <<http://agendaa.com.br/negocios/economia/4291/2015/09/09/alagoas-ja-esta-entre-os-10-maiores-produtores-de-energia-de-biomassa-do-pais-veja-ranking>>. Acessado em 05/10/2015.

AMBIENTE BRASIL. **Energia Maremotriz.** Disponível em <<http://ambientebrasil.com.br>>. Acessado em 05/10/2015.

AMÉRICA DO SOL. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em <<http://americadosol.org/mercado-mundial>>. Acessado em 15/06/2016.

ANEEL. Módulo 1 – Introdução. *In:* AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.** 4. ed. [S. 1.]:[s. n.], 2012 .

ANEEL. **Potencial Eólico Brasileiro.** Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_3.htm>. Acessado em 10/06/2015.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2015.

BERNARDES, M. **Energia Renovável: Usinas Maremotrizes.** Disponível em <<http://blogs.pini.com.br/posts/tecnologia-sustentabilidade/energia-renovavel-usinas-maremotrizes-344851-1.aspx>>. Acessado em 14/06/2016.

BLUESOL EDUCACIONAL. **Energia Solar.** Disponível em <<http://www.bluesol.com/energia-solar/energia-solar-pode-afastar-risco-de-apagoes/>>. Acessado em 05/10/2015.

CANALTECH. **Recorde: Alemanha Cobre 95% da Demanda de Energia Elétrica com Fontes Renováveis.** Disponível em <<https://canaltech.com.br/noticia/sustentabilidade/alemanha-cobre-95-da-demanda-de-energia-eletrica-com-fontes-renovaveis-65953/>>. Acessado em 15/12/2016.

CARVALHO C. M, Paulo; NETO R. B, Manuel. **Geração de Energia Elétrica: Fundamentos.** 1. Ed. São Paulo: Editora Érica, 2012.

CAVALCANTE, F. Análise de projetos de investimento. *Up-To-Date*, São Paulo, ano I, n. 8, 1998.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia Solar - Princípios e aplicações.** 2006.

DINÂMICA AMBIENTAL. **Confira Como Funciona a Turbina Eólica de Eixo Vertical.** Disponível em <<http://www.dinamicambiental.com.br/blog/sustentabilidade/confira-funciona-turbina-eolica-eixo-vertical/>>. Acessado em 05/05/2016.

DUNIVERSO. **Energia Maremotriz.** Disponível em <<http://www.duniverso.com.br/energia-limpa-e-autossustentavel-vinda-mar-em-pecem-ceara-2/>>. Acessado em 05/10/2015.

ECOVILARESORT. **Gerar Sua Própria Eletricidade Já é Economicamente Viável.** Disponível em <<http://ecovilaresort.com.br/noticia.php?cod=226>>. Acessado em 05/10/2015.

ENERGIAPURA. **Produtos.** Disponível em <<http://www.energiapura.com/produtos>>. Acessado em 05/10/2015.

ENERGINET. *New Record-Breaking Year For Danish Wind Power.* Disponível em <<http://energinet.dk/EN/El/Nyheder/Sider/Dansk-vindstroem-slaar-igen-rekord-42-procent.aspx>>. Acessado em 15/12/2016.

ENERSUD. **Curva de Potência Gerar246.** Disponível em <<http://energinet.dk/EN/El/Nyheder/Sider/Dansk-vindstroem-slaar-igen-rekord-42-procent.aspx>>. Acessado em 15/12/2016.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.** Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.

ÉPOCA NEGÓCIOS. **Energia Eólica.** Disponível em <<http://epocanegocios.globo.com/Caminhos-para-o-futuro/Energia/noticia/2014/08/brasil-avanca-em-energia-solar-e-eolica.html>>. Acessado em 05/10/2015.

FUNCEME. **Previsão do Tempo.** Disponível em <<http://www.funceme.br/>>. Acessado em 20/10/2015.

LANDISGYR. **Medidores Comerciais e Industriais.** Disponível em <<http://www.landisgyr.com.br/product/e750/>>. Acessado em 05/05/2016.

MAGALHAES, M. V. **Estudo de Utilização da Energia Eólica Como Fonte Geradora de Energia no Brasil.** Florianópolis, SC, Brasil, 2009.

MARTINS, L.S.; **Geração de Energia Através de Biomassa,** Projeto de Graduação, 2006.

MONTEIRO P. A. S. C. **Interface de um Gerador Eólico de Pequena Potência com a Rede Eléctrica.** Minho, Portugal, 2010.

PORTALSOLAR. **Quanto Custa a Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em <<http://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>>. Acessado em 05/05/2016.

PRATIL. **Microgeração de Energia Elétrica.** Disponível em <<http://pratil.com.br/site/energia-solar/sobre>>. Acessado em 05/10/2015.

REN21 – *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2015: Global Status Report*. 2015.

SPE/MME. **Energia Eólica no Brasil e Mundo**. Ano de Referência – 2015. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Brasília, 2016.

SPE/MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo**. Ano de Referência – 2015. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Brasília, 2016.

TOMÉ. **Projetos Eólicos**. Disponível em <<http://www.tome.com.br/equipamentos-transporte/quem-somos>>. Acessado em 05/05/2016.

URSAIA, G. C. **A Regulação da Microgeração e Minigeração de Energia no Brasil**. Disponível em <<http://www.ambientelegal.com.br/aregulacao-da-microgeracao-e-minigeracao-de-energia-no-brasil/>>. Acessado em 05/10/2015.

VIRIDIAN. **Sistema interligado**. Disponível em <<http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+eolica/6>>. Acessado em 05/10/2015.

WBA [*World Bioenergy Association*]. *WBA Global Bioenergy Statistics*, 2014.