



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
DEPARTAMENTO DO CURSO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO – CECAU



DÊNIA AMÉLIA VILAÇA LIMA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-  
FOTOVOLTAICO**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO

**Ouro Preto, 2017**

DÊNIA AMÉLIA VILAÇA LIMA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-  
FOTOVOLTAICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Professor Sávio Augusto Lopes da Silva

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Agosto/2017

L732a Lima, Dênia Amélia Vilaça.  
Análise energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico [manuscrito] /  
Dênia Amélia Vilaça Lima. - 2017.

36f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Geração de energia fotovoltaica. 4. Recursos naturais renováveis. I. Silva, Sávio Augusto Lopes da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

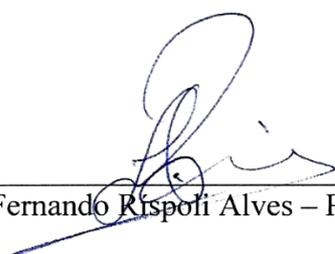
Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)

Monografia defendida e aprovada, em 23 de agosto de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva - Orientador



---

Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Professor Convidado



---

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

## RESUMO

O uso de fontes alternativas para geração de energia elétrica é cada vez mais recorrente e inevitável. Entre os principais motivos, está o aumento exponencial da demanda energética, que faz com que as fontes de produção de eletricidade baseadas em recursos finitos emitam cada vez mais poluentes na atmosfera. Além disso, tecnologias são desenvolvidas para o maior aproveitamento dos recursos naturais, como o sol e o vento, que não poluem e são inesgotáveis. Neste trabalho, após uma revisão teórica sobre as fontes eólica e solar e o sistema híbrido, é feito um estudo de caso para analisar a viabilidade da aplicação do sistema híbrido eólico-fotovoltaico em uma edificação contendo dez pavimentos e vinte apartamentos. Neste estudo de caso, infere-se o consumo de carga de todo o edifício, considerando o consumo individual de cada apartamento e o consumo de áreas comuns. Por fim, são dimensionados os equipamentos necessários para abastecer parte da demanda calculada em um sistema interligado à rede.

**Palavras-chave:** Sistema híbrido, energia eólica, energia fotovoltaica, energia renovável.

## **ABSTRACT**

The use of alternative sources for electric power generation is increasingly recurrent and unavoidable. Among the main reasons is the exponential increase in energy demand, which causes electricity-based sources of finite resources to emit more and more pollutants into the atmosphere. In addition, technologies are developed for the greater use of natural resources, such as the sun and wind, which do not pollute and are inexhaustible. In this work, after a theoretical review on wind and solar sources and the hybrid system, a case study is made to analyze the viability of the wind-solar hybrid system in a building containing ten floors and twenty apartments. In this case study, it is inferred the load consumption of the whole building, considering the individual consumption of each apartment and the consumption of common areas. Finally, the necessary equipment is dimensioned to supply part of the calculated demand in a system connected to the network.

**Keywords:** Hybrid system, wind energy, photovoltaics, renewable energy.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	7
1.2	MOTIVAÇÃO .....	7
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	7
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1	ENERGIA EÓLICA .....	8
2.1.1	POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO .....	8
2.1.2	INCENTIVOS À ENERGIA EÓLICA .....	10
2.1.3	SISTEMA EÓLICO .....	11
2.1.3.1	TIPOS DE AEROGERADORES .....	12
2.1.4	MICROGERADORES EÓLICOS RESIDENCIAIS .....	13
2.1.5	TIPOS DE APLICAÇÕES .....	15
2.2	ENERGIA SOLAR .....	16
2.2.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	18
2.2.1.1	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	18
2.2.1.2	INVERSORES .....	19
2.2.1.3	CONTROLADORES DE CARGA .....	19
2.2.1.4	BATERIAS .....	20
2.2.2	POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO .....	20
2.2.3	INCENTIVOS À ENERGIA SOLAR .....	22
2.3	SISTEMAS HÍBRIDOS .....	23
2.3.1	TIPOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS .....	23
2.3.2	SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO-FOTOVOLTAICO .....	24
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>	<b>25</b>
3.1	FUNDAMENTOS DO ESTUDO DE CASO .....	25
3.2	DIMENSIONAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	27
3.3	PROJETO DO SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO .....	29
3.3.1	ANÁLISE DO RECURSO DISPONÍVEL .....	30
3.3.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO .....	31
<b>4.</b>	<b>RESULTADO E ANÁLISE .....</b>	<b>33</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>34</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CC	Corrente Contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COBEI	Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GW	Gigawatt
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
INCT – Clima	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas
Instituto IDEAL	Instituto para Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina
kW	Kilowatt
kW/m <sup>2</sup>	KiloWatt por metro quadrado
kWh	KiloWatt hora
kWh/m <sup>2</sup>	KiloWatt hora por metro quadrado
LED	<i>Light Emitter Diode</i>
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
MW	Megawatt
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
W	Watt
Wh/m <sup>2</sup>	Watt-hora por metro quadrado

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO A 50M DE ALTURA .....	9
FIGURA 2 – COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO .....	11
FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL .....	12
FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS DE ACORDO COM O NÚMERO DE PÁS .....	13
FIGURA 5 – SISTEMA EÓLICO ISOLADO .....	15
FIGURA 6 – SISTEMA EÓLICO INTERLIGADO À REDE .....	16
FIGURA 7 – PROCESSO HIERARQUIZADO DE AGRUPAMENTO FOTOVOLTAICO .....	18
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DE N MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	18
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ASSOCIAÇÃO EM PARALELO DE N MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	19
FIGURA 10 – MÉDIA ANUAL DE INSOLAÇÃO DIÁRIA NO BRASIL .....	21
FIGURA 11 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA HÍBRIDO .....	24
FIGURA 12 – PLANTA BAIXA DE APARTAMENTO DE 55m <sup>2</sup> .....	26
FIGURA 13 – PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO-TIPO .....	26

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – CONSUMO DE CARGA POR APARTAMENTO .....	28
TABELA 2 – CONSUMO DE CARGA EM ÁREAS COMUNS .....	28

## **1. INTRODUÇÃO**

Há vários anos o homem vem usando como forma de obtenção de energia fontes findáveis e altamente poluentes, como o petróleo e carvão mineral. Porém, com o passar do tempo e a exploração intensiva desses recursos, houve uma acentuada degradação ambiental. Assim, para assegurar o fornecimento de energia sem causar prejuízo ao meio ambiente, houve a necessidade de buscar novas formas de produção de energia.

Assim, inseridas neste contexto sustentável, as fontes solar e eólica tornaram grandes aliadas na produção de energia renovável e limpa. Tecnologias são desenvolvidas buscando o maior aproveitamento dessas fontes, que ganham cada vez mais espaço na matriz energética mundial.

Porém, o uso cotidiano dessas fontes no Brasil ainda é pequeno, comparado com seu potencial energético e com a produção em outros países. Os sistemas eólico e fotovoltaico podem ser utilizados em qualquer local com recursos disponíveis, como residências, e, aliados a um único sistema híbrido, o potencial de produção é ainda maior.

### **1.1 Objetivos do trabalho**

Este trabalho tem por objetivo a análise da viabilidade da aplicação de um sistema híbrido em um local hipotético com recursos naturais suficientes para produzir energia elétrica que forneça boa parte da demanda de carga necessária. Para isso, foi feito um estudo de caso, sugerindo o dimensionamento de carga de uma edificação residencial com dez pavimentos e vinte andares.

### **1.2 Motivação**

A motivação para este trabalho é analisar a utilização de duas fontes renováveis aliadas em um único sistema com o intuito de utilizar ao máximo os recursos naturais disponíveis, uma vez que sozinhas já representam grande potencial de produção de energia.

### **1.2 Estrutura do trabalho**

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. O primeiro apresenta um contexto introdutório e motivacional. O segundo capítulo faz uma revisão teórica sobre as energias eólica e solar e o sistema híbrido. No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do trabalho, onde se insere o estudo de caso; sua análise é feita no quarto capítulo. Por fim, no último capítulo são tratadas as considerações finais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Energia eólica**

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento transformada em energia elétrica por meio de aerogeradores.

Em um contexto histórico, a energia eólica começou a ser utilizada por volta de 200 a.C. para o bombeamento de água e moagem de grãos. Com o surgimento da máquina a vapor, durante a Revolução Industrial no século XIX, houve um declínio do uso desse tipo de energia, ressurgindo somente na década de 1970 com a crise internacional do petróleo, quando maiores investimentos foram feitos com o intuito de assegurar o fornecimento de energia elétrica e proteger o meio ambiente, que já apresentava sinais de degradação devido ao uso acentuado de combustíveis fósseis.

Atualmente, a energia eólica é uma das fontes mais promissoras de energia elétrica, uma vez que não emite poluentes e é proveniente de recursos naturais inesgotáveis. Além disso, investe-se cada vez mais na criação e aprimoramento de tecnologias que permitem que os sistemas eólicos se tornem mais eficientes, confiáveis e baratos.

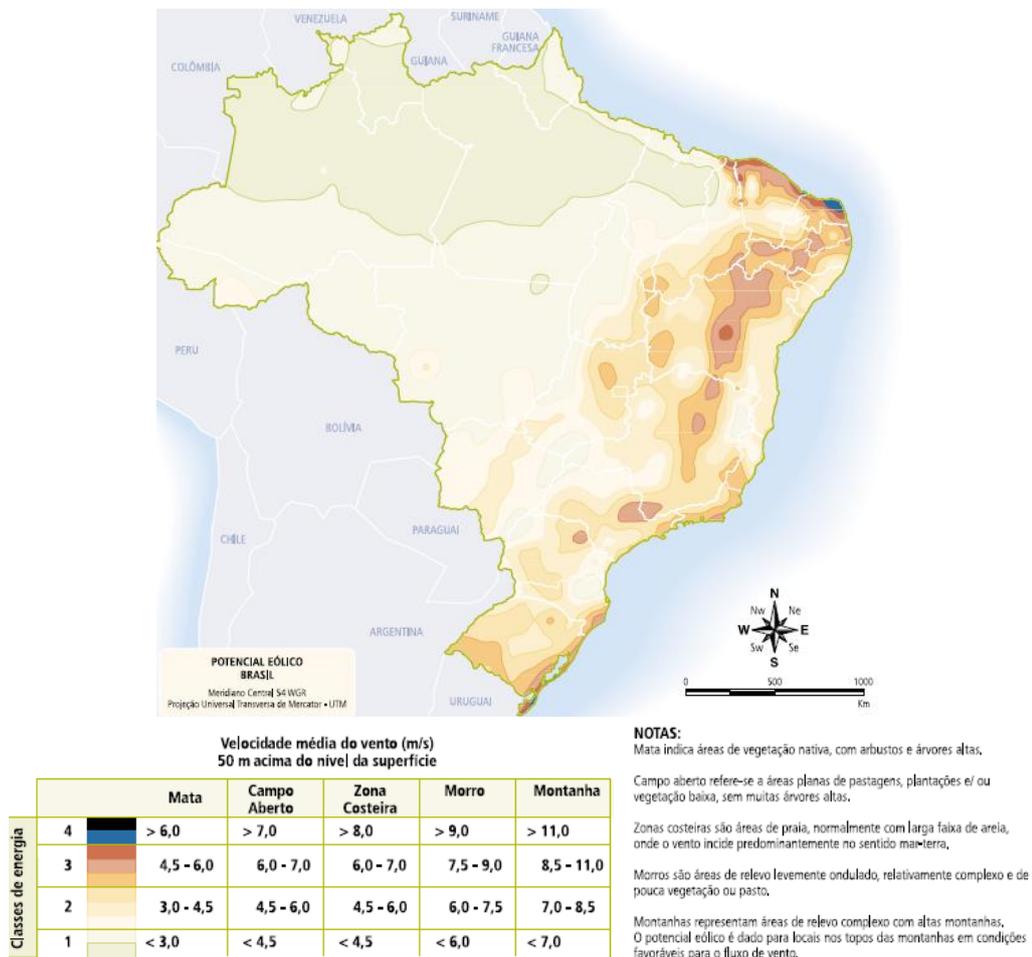
#### **2.1.1 Potencial eólico brasileiro**

O estudo do potencial eólico no Brasil iniciou-se por volta da década de 1970, porém o primeiro Atlas do Potencial Eólico Nacional foi concluído em meados da década de 1980, determinando que as maiores velocidades dos ventos ocorrem no litoral e áreas do interior do país com alto relevo e pouca rugosidade. O relevo influencia na produção de energia eólica por ser um obstáculo ao movimento das massas de ar, além de ser um determinante nos fenômenos climáticos e meteorológicos.

O último Atlas do Potencial Eólico Nacional foi realizado em 2001, pelo CRESESB, determinando que o potencial anual de geração de energia no Brasil seria de 143 GW, considerando torres com altura de 50 metros acima do nível do mar. Porém, um novo levantamento de dados está sendo realizado, uma vez que os atuais aerogeradores atingem cerca de 100 metros de altura. Segundo estudo do INCT – Clima, com apoio do CNPq e FAPESP, a capacidade de produção de energia eólica no Brasil pode ser seis vezes maior.

Para que um sistema eólico seja útil, seu aproveitamento deve ser superior a 500 W/m<sup>2</sup>, considerando um aerogerador de grande porte com 50 metros de altura e ventos com velocidade mínima de 7 m/s (ANEEL, 2005). A partir dessas características, a figura 1 representa o estudo realizado pela ANEEL, Ministério da Ciência e Tecnologia e CBEE. É

possível observar que o litoral apresenta as áreas com melhor aproveitamento dos ventos, destacando-se a região Nordeste, sendo Rio Grande do Norte o estado com as maiores velocidades médias, superiores a 7 m/s. As regiões Centro-Oeste e Norte possuem o menor potencial eólico do país, com velocidades médias inferiores a 3 m/s, e as demais regiões podem ou não ser favoráveis, dependendo de condições topográficas.



**Figura 1 – Velocidade média anual do vento a 50m de altura**

**Fonte: ANEEL – Atlas Energia Eólica**

Apesar de ainda não atingir o potencial máximo de produção de energia eólica, o Brasil possui grande capacidade de expansão das áreas economicamente viáveis para a instalação dos aerogeradores. Esse fator, juntamente com a desaceleração das economias europeia e americana a partir de 2008, contribuiu para que os fabricantes buscassem o mercado brasileiro, favorecendo o desenvolvimento das tecnologias aplicadas nos sistemas eólicos produzidos aqui.

Apesar do grande potencial de exploração eólica no Brasil, seja para grandes complexos ou geração distribuída, sua participação na matriz elétrica é limitada, visto que a natureza dos ventos é variável e dependente de condições climáticas. Além disso, sua distribuição é suscetível a falhas nos parâmetros de qualidade das redes. Assim, necessita-se de grandes investimentos na automação e gerenciamento do setor elétrico, com implantação de redes inteligentes.

### **2.1.2 Incentivos à energia eólica**

Em 2002 iniciou-se o PROINFA, mediante leilões de fontes alternativas ou específicos para a geração eólica. Os objetivos deste programa eram assegurar o suprimento de energia elétrica, inserir a energia eólica no setor elétrico e diminuir as tarifas em vigor.

A comercialização de energia elétrica é feita de dois modos: o Ambiente de Contratação Regulada, feito a partir de licitações por meio de leilões e utilizando a menor tarifa, e o Ambiente de Contratação Livre, em que há livre negociação nas operações de compra e venda de energia.

Em 2007 foi realizado o primeiro Leilão de Fontes Alternativas, porém sem sucesso devido ao critério de menor tarifa, que define, entre concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público, a distribuição de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional, visando à eficiência na contratação de energia.

O segundo Leilão de Energia de Reserva ocorreu em 2009 a fim de promover a ampliação da participação eólica na matriz energética brasileira, obtendo maior êxito que o primeiro. Posteriormente outros leilões foram realizados, estimulando a contratação de fontes alternativas, com destaque para a energia eólica, aumentando sua competitividade no mercado e atraindo novas empresas do ramo.

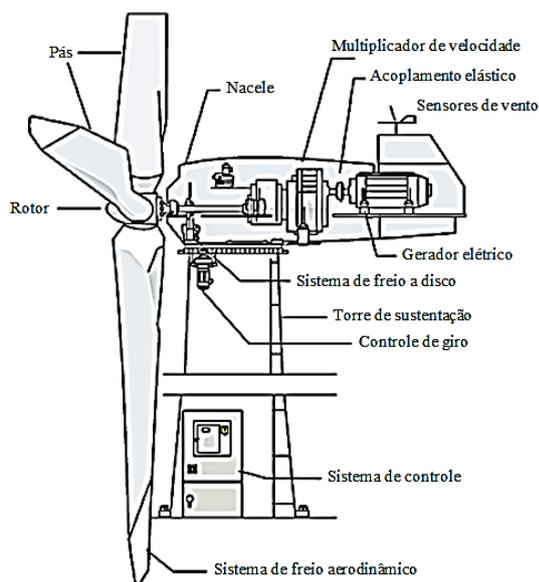
Desde 2007, por meio do Convênio 101/97, o CONFAZ isentou o segmento de energia eólica do ICMS, favorecendo a compra de equipamentos, especialmente aerogeradores e acessórios como reguladores e controladores. Inicialmente o convênio estaria em vigor até o ano de 2015, porém em 2012 o CONFAZ estendeu esse prazo para o ano de 2020 (LAGE; PROCESSI, 2013).

Outros recursos são utilizados para incentivar a participação eólica na matriz energética, além do sistema de leilões, como aplicação do sistema *feed-in* (estabelece o valor mínimo que uma concessionária deverá pagar ao produtor pela energia elétrica produzida, em caso de sistemas conectados a rede), plano de cotas com certificado verde (garante que uma

cota de geração de energia vendida deva ser gerada a partir de fontes alternativas) e sistema de *net metering* (regula a transferência de energia entre concessionárias e usuários, acumulando ou debitando créditos quando há excedente ou déficit de energia).

### 2.1.3 Sistema eólico

Um sistema eólico utiliza a energia cinética das massas de ar para gerar energia elétrica. Esse processo de geração é realizado basicamente por meio de um aerogerador (ou turbina eólica), composto por uma torre, um conjunto de pás fixado a um rotor e uma nacelle, onde se localizam os demais equipamentos, como gerador eólico e multiplicador, como na figura 2.



**Figuras 2 – Componentes de um sistema eólico**

**Fonte: ANEEL – Atlas Energia Eólica**

As pás capturam a energia cinética do vento e a convertem em energia rotacional no eixo, que transfere a energia de rotação para o gerador. A nacelle é uma estrutura que abriga componentes como o multiplicador de velocidade (engrenagens que aumentam a velocidade de rotação entre eixo e gerador), o gerador (transforma energia rotacional em energia elétrica a partir do princípio do eletromagnetismo) e sistema de freio a disco (controla a rotação do eixo em caso de sobrecarga de energia ou falha no sistema). Já os sensores de vento alinham o rotor à direção das massas de ar, enquanto o sistema de controle monitora toda a turbina eólica, desligando-a em caso de falha e ajustando o mecanismo de alinhamento do sistema com o vento. A torre de sustentação suporta todo o sistema, o erguendo a uma altura favorável para o movimento das pás.

As últimas inovações tecnológicas se referem à utilização de acionamento direto, ou seja, sem uso do multiplicador de velocidades, com geradores síncronos e sistemas que permitem que as turbinas funcionem com velocidade variável. Em relação ao local, as turbinas podem ser instaladas em terra firme (*onshore*) ou no mar (*offshore*).

### 2.1.3.1 Tipos de aerogeradores

Os aerogeradores ou turbinas eólicas podem ser classificados quanto ao porte, à posição do eixo de rotação, à posição do rotor em relação à torre e ao número de pás.

Em relação ao porte, as turbinas podem ser pequenas (potência nominal inferior a 500 kW), médias (potência nominal entre 500 kW e 1000 kW) ou grandes (potência nominal acima de 1000 kW).

Quanto à posição do eixo de rotação, as turbinas eólicas podem ser classificadas em turbinas de eixo vertical (*Vertical Axis Wind Turbine*) e turbinas de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*), as quais são as mais utilizadas e, por isso, serão especificadas a seguir.

No que se refere à posição do rotor em relação à torre, as turbinas de eixo horizontal podem ser classificadas em *upwind* e *downwind*, de acordo com a figura 3. Nas turbinas *upwind*, as mais usadas, o vento incide pela frente do aerogerador, evitando o distúrbio causado pela torre no vento. Porém, há necessidade de um mecanismo de orientação direcional devido à rotação das pás causar pulsações de torque na turbina, demandando maior carga. Já nas turbinas *downwind*, o vento atinge o rotor pela parte de trás do aerogerador. Essa configuração não necessita de um mecanismo de orientação direcional, mas a torre causa turbulência no vento e as pás geram muitos ruídos (MARQUES, 2004).

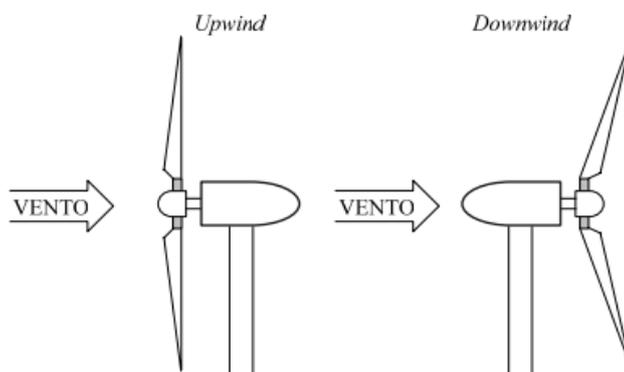
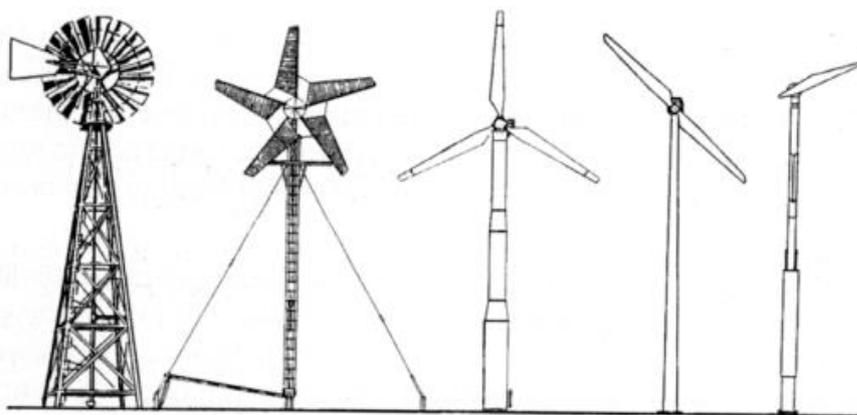


Figura 3 – Classificação das turbinas de eixo horizontal

Fonte: MARQUES, 2004 – Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla indução.

O número de pás das turbinas está relacionado com a necessidade da área de varredura, ou seja, quanto maior a velocidade de operação, menor será o número de pás. Atualmente, os rotores com três pás são os mais utilizados. Apesar dos rotores de uma e duas pás terem um custo menor, seu projeto é mais complexo, uma vez que os esforços causados pela passagem das pás pela torre devem ser evitados. Além disso, esses aerogeradores produzem mais ruídos, já que apresentam grande velocidade de rotação (MARQUES, 2004). A figura 4 mostra os tipos de turbinas, de acordo com o número de pás.



**Figura 4 – Classificação das turbinas de acordo com o número de pás**

**Fonte: MARQUES, 2004 – Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla indução.**

#### **2.1.4 Microgeradores eólicos residenciais**

Esta seção fará uma síntese sobre os aerogeradores eólicos residenciais, visto que o intuito deste trabalho é analisar um sistema híbrido eólico-fotovoltaico aplicado a uma situação próxima da realidade de consumo domiciliar. As informações a seguir são baseadas no “Guia de microgeradores eólicos” do Instituto IDEAL, organização privada sem fins lucrativos atuante no desenvolvimento de energias renováveis e políticas de integração energética na América Latina.

Os micro e minigeradores são sistemas eólicos capazes de produzir energia elétrica suficiente para abastecer pequenos consumidores, como casas, condomínios e comércios. O potencial dos microgeradores é de até 75 kW e dos minigeradores entre 75 kW e 5MW. Eles devem ser instalados em torres ou no topo das edificações, de preferência distantes de obstáculos como árvores e outras edificações para que o vento não sofra interferências.

Como mencionado anteriormente, a posição do eixo de rotação pode ser vertical ou horizontal, sendo os aerogeradores de eixo de rotação horizontal os mais usados pelo fato de serem mais eficientes; no entanto, são mais ruidosos que os verticais.

Algumas características devem ser consideradas durante a escolha das turbinas, como a velocidade do vento necessária para que o microgerador alcance a potência nominal, a velocidade mínima do vento para que o microgerador funcione e a velocidade máxima para que ele desligue. Segundo essas informações, as turbinas podem ser selecionadas de acordo com a posição do rotor:

- Rotor horizontal: possui três ou mais pás; modelo mais eficiente quando utilizado em casos em que o vento não sofre grandes variações de direção; não possui sistema de controle das pás ou eixo interno; produz ruídos.
- Rotor Savonius: rotor com eixo vertical com duas pás onduladas em formato de “S”; gera energia com pouco vento; produz pouco ruído; suporta ventos turbulentos; ideal para áreas urbanas; possui baixa potência.
- Rotor Darrieus: rotor com eixo vertical e pás arqueadas; possui potências maiores; ideal para áreas urbanas; produz ruídos; necessita de um sistema de aceleração inicial; tem custo superior aos outros modelos.
- Rotor H-Darrieus: rotor em eixo vertical com pás paralelas; mais eficiente que o modelo Darrieus; produz pouco ruído; não precisa de um sistema de aceleração inicial.

Ainda sobre a escolha dos microgeradores, o consumidor deverá estar atento às suas necessidades de consumo energético, gerando no máximo o potencial consumido ao longo de um ano ou considerando o uso de créditos para compensação em outras unidades consumidoras que possuem o mesmo titular, segundo o Sistema de Compensação de Energia, que estipula o valor mensal a ser pago de acordo com a diferença entre a energia consumida da rede de distribuição e a energia produzida pelo sistema eólico e injetada na rede.

O projeto de instalação é feito analisando, primeiramente, o consumo de energia elétrica durante certo período para determinar a capacidade do sistema eólico. Depois, são conhecidas as condições físicas do local para que a turbina seja instalada com o melhor posicionamento. Segundo o Guia de Microgeradores Eólicos, para assegurar o melhor aproveitamento do vento, os microgeradores devem ser instalados a uma altura de pelo menos 10 metros a mais que o obstáculo mais alto dentro de um raio de 150 metros. Além disso, deve-se verificar a possibilidade de emissão de ruídos e se há acesso adequado para o transporte de equipamentos e ferramentas de montagem.

Condomínios horizontais ou verticais, residenciais ou comerciais, podem instalar um sistema eólico e repartir os créditos entre os condôminos, sem necessariamente utilizar a energia produzida para o consumo das instalações internas.

A manutenção dos sistemas eólicos é muito pequena, mas alguns cuidados devem ser tomados para que ele opere com a máxima eficiência, como monitorar a produção de energia por meio de um inversor, verificar ruídos e possíveis vibrações que danificam o sistema e observar as condições das pás.

### 2.1.5 Tipos de aplicações

Segundo o CRESESB, atualmente existem três tipos de aplicações distintas dos sistemas eólicos que se ajustam às mais diversas condições de instalação e necessidades. Os sistemas podem ser isolados, híbridos ou interligados à rede, cada um obedecendo a uma configuração básica que inclui uma unidade de controle de potência e uma unidade de armazenamento, quando necessário.

Os sistemas isolados (*off grid*) são sistemas normalmente aplicados a locais que não possuem acesso à transmissão de energia, por isso necessitam de alguma forma de armazenamento de energia, como baterias. Com a utilização de baterias, é necessária a utilização de um sistema de controle para evitar danos de sobrecarga ou descarga profunda. Também é preciso utilizar um inversor em casos de uso de equipamentos que operam com corrente alternada. A figura 5 mostra a configuração de um sistema eólico isolado.

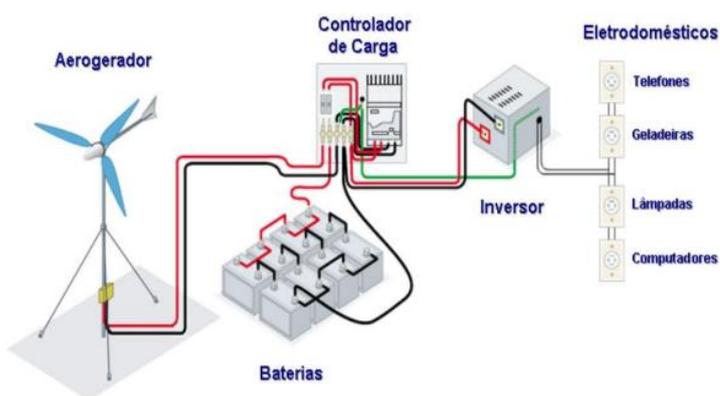
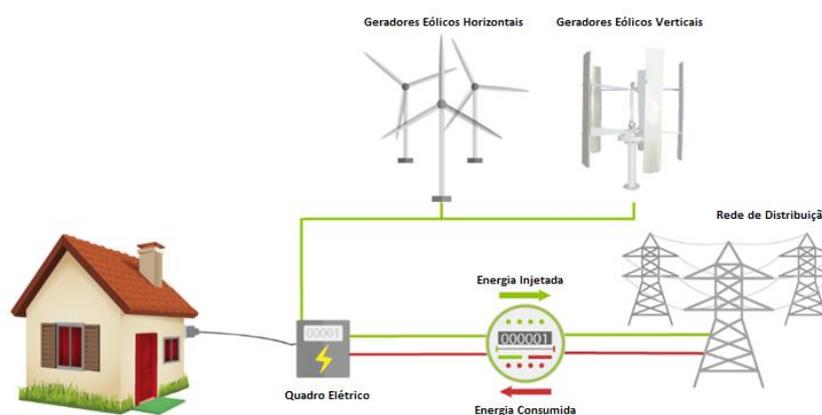


Figura 5 – Sistema eólico isolado

Fonte: DUTRA, 2008 – Energia Eólica, Princípios e Tecnologias.

Já os sistemas interligados à rede (*on grid*) não necessitam de armazenamento de carga, uma vez que a produção de energia elétrica é entregue à rede de distribuição, gerando descontos na conta de energia, independente do período do dia. Caso a energia gerada não seja suficiente, a distribuidora de energia compensa o que faltar, assim o cliente paga a energia consumida da rede elétrica menos o que foi produzido por ele. Esses sistemas podem ser de pequeno porte (geração distribuída), como na figura 6, ou de grande porte (parques eólicos).



**Figura 6 – Sistema eólico interligado à rede**

**Fonte: Adaptado de MRMECOM Eficiência Energética**

Os sistemas híbridos serão especificados com maior ênfase posteriormente, uma vez que são o objeto de estudo deste trabalho.

## 2.2 Energia solar

A energia proveniente do Sol é fonte de vários fenômenos atmosféricos e processos químicos, físicos e biológicos. Essa energia pode ser aproveitada de várias formas, até mesmo na geração de energia elétrica através da conversão direta da luz, feita por células fotovoltaicas.

A energia solar fotovoltaica vem se tornando uma importante fonte de produção de eletricidade, uma vez que a energia advinda do Sol é inesgotável, não polui e é acessível a lugares remotos. Além disso, o atual modelo energético, baseado em recursos finitos como combustíveis fósseis, vem sendo questionado, pois com o crescimento populacional há o aumento exponencial da demanda energética e, por consequência, a maior emissão de poluentes na atmosfera, alterando as condições climáticas do planeta.

Dessa forma, a energia solar fotovoltaica, assim como a energia eólica, se insere na procura de um modelo baseado no desenvolvimento sustentável. Segundo o Relatório da Comissão Brundtland "Our Common Future" de 1987, "...desenvolvimento sustentável consiste em satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias demandas".

A energia solar fotovoltaica é obtida a partir do princípio do efeito fotoelétrico, que consiste em converter diretamente a radiação solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas. O efeito fotoelétrico foi observado quando Heinrich Hertz, em 1887, investigava a natureza eletromagnética da luz. Esse efeito ocorre quando a luz de determinada frequência incide em uma placa metálica, gerando uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor e fazendo com que haja emissão de elétrons. Outra placa, com energia potencial elétrica maior, é colocada na frente da primeira para que os elétrons soltos sejam absorvidos. A célula fotovoltaica mantém o fluxo de elétrons no circuito enquanto houver incidência de luz sobre ela, não armazenando energia elétrica.

As células podem ser fabricadas com diferentes materiais semicondutores, porém as mais comuns disponíveis comercialmente são constituídas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo.

As células monocristalinas, as quais possuem maior eficiência, são feitas a partir de lingotes de silício ultrapuro, extraídos do mineral quartzo. Os lingotes são fatiados até se tornarem lâminas de silício, submetidas posteriormente a processos de dopagem para que ocorram as propriedades fotovoltaicas. A lâmina de silício dopada recebe posteriormente os eletrodos e o tratamento anti-reflexivo, originando a célula fotovoltaica. Os painéis de silício monocristalino ocupam menos espaço, por serem mais eficientes, e tem uma vida útil de cerca de 30 anos, porém são mais caros.

As células policristalinas também são feitas a partir de lingotes de silício, a principal diferença entre os dois tipos é o método utilizado na fundição dos cristais. Os cristais de silício são fundidos em um bloco, preservando sua formação, assim quando o bloco é cortado, é possível observar a múltipla formação dos cristais. Depois de fundidos, eles são serrados em blocos quadrados e fatiados em células, como nas monocristalinas. O processo produtivo é mais simples, porém as células são menos eficientes.

As células de silício amorfo apresentam alto grau de desordem na estrutura dos átomos. Seu processo de fabricação é simples, possui custo reduzido e baixo consumo de energia, porém as células possuem pouca eficiência de conversão, se comparadas às células

mono e policristalinas, e sofrem degradação nos primeiros meses de operação. Cada técnica produz cristais com tamanho, forma e nível de impureza diferentes.

## 2.2.1 Sistema Fotovoltaico

### 2.2.1.1 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, principais componentes do sistema fotovoltaico, são agrupamentos de células, uma vez que isoladas não conseguem obter a tensão e corrente de saída suficientes para sua utilização. Da mesma forma, os painéis fotovoltaicos são conjuntos de módulos, conforme a figura 7.

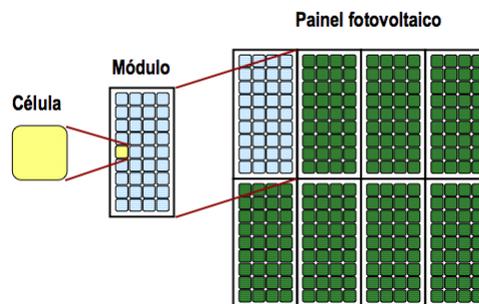


Figura 7 – Processo hierarquizado de agrupamento fotovoltaico

Fonte: DocPlayer – Módulos fotovoltaicos – características e associações

Os módulos podem ser associados eletricamente em série ou paralelo, de modo a conseguir a potência máxima do painel fotovoltaico. Devem ser usados módulos do mesmo tipo a fim de evitar perdas de potência no sistema. A associação em série, conforme representada na figura 8, permite conseguir tensões maiores, mantendo a corrente determinada do módulo. Já a ligação em paralelo possibilita correntes elevadas e preserva o nível de tensão do módulo, de acordo com a figura 9.

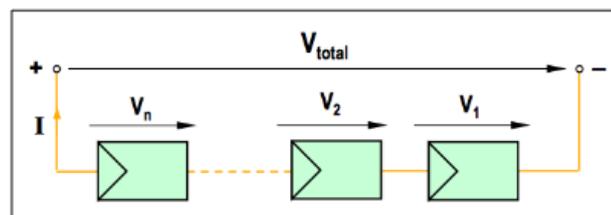
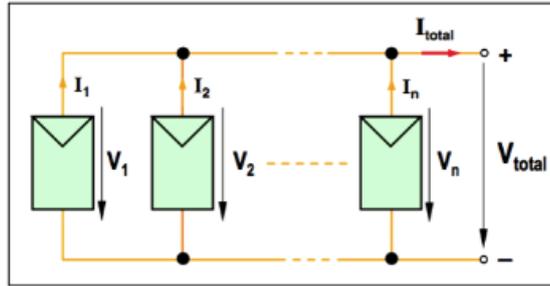


Figura 8 – Representação esquemática da associação em série de n módulos fotovoltaicos

Fonte: DocPlayer – Módulos fotovoltaicos – características e associações



**Figura 9 – Representação esquemática da associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos**

**Fonte: DocPlayer – Módulos fotovoltaicos – características e associações**

### **2.2.1.2 Inversores**

O inversor é um dispositivo eletrônico cujo objetivo é converter a corrente contínua (CC) gerada pelas células fotovoltaicas em corrente alternada (CA). A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Além disso, no caso de sistemas interligados à rede elétrica, a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede. O inversor também garante a segurança do sistema e é responsável pelo monitoramento e otimização da energia produzida (PINHO; GALDINO, 2014).

Os inversores podem ser classificados em comutados pela rede (comutação natural) ou autocomutados (comutação forçada). Os inversores comutados pela rede operam somente quando a rede elétrica estiver em funcionamento, garantindo uma desconexão e desligamento do inversor de forma mais segura, além de evitar sua operação isolada. Os inversores autocomutados são utilizados em aplicações menores quando se quer manter o atendimento durante o período de ausência da rede elétrica (MACEDO, 2006).

Eles podem ser instalados em diferentes locais, de acordo com a finalidade de cada aparelho, como próximo do quadro de distribuição ou dos módulos fotovoltaicos.

### **2.2.1.3 Controladores de carga**

Os controladores de carga são equipamentos que monitoram a bateria evitando que ela se descarregue por completo nos períodos de grande consumo ou sem insolação e se sobrecarregue em situações contrárias, reduzindo sua vida útil. O controlador interrompe o processo de carga quando a tensão alcança um valor para o qual é considerado que a bateria se encontra carregada, abrindo o circuito entre os módulos fotovoltaicos e a bateria (controle tipo série) ou curto-circuitando os módulos fotovoltaicos (controle tipo shunt). Quando há

consumo de carga e a bateria começa a descarregar-se, o controlador novamente conecta o gerador à bateria, recomeçando o ciclo.

Ao dimensionar um controlador de carga deve-se especificar o nível de tensão e a corrente máxima de operação. A capacidade do controlador deve superar a corrente dos painéis ou as de consumo, de acordo com o maior valor.

#### **2.2.1.4 Baterias**

Baterias são equipamentos que armazenam a carga produzida pelos módulos fotovoltaicos. As baterias mais adequadas para essa finalidade são as baterias estacionárias, que diferem das convencionais por utilizarem materiais mais nobres e placas de chumbo mais espessas, o que permite que suportem descargas profundas sem reduzir sua vida útil. Essas baterias duram de 4 a 10 anos, de acordo com o ciclo de carga que sofrem, e possuem um filtro de segurança que evita vazamento de soluções ácidas, explosões e oxidação dos terminais.

Outro tipo de bateria utilizada em sistemas de produção de fontes alternativas de energia é a bateria OPzS. Elas possuem vida útil longa, excedendo 10 anos, porém liberam gases que podem causar explosões caso o armazenamento não seja feito em local adequado.

As baterias VRLA , ou baterias estacionárias seladas de chumbo-ácido reguladas por válvula, se caracterizam por não emitirem gases para o meio ambiente. São utilizadas em diversas posições, devido ao aprisionamento do eletrólito por absorção ou gelificação, e dispensam grandes cuidados na manutenção.

Já as baterias AGM são mais robustas, pois são mais resistentes a temperaturas extremas, a elevados ciclos de carga, a vibrações e a choques mecânicos. Além disso, não requerem manutenção e recarregam com maior facilidade. Dessa forma, são mais caras, entretanto muito úteis para determinados tipos de projetos. Há também as baterias com eletrólito em gel que não liberam gases, podendo ser armazenadas em ambientes fechados. São muito utilizadas em sistemas fotovoltaicos instalados em embarcações, uma vez que sua camada em gel dá maior estabilidade e segurança.

#### **2.2.2 Potencial solar brasileiro**

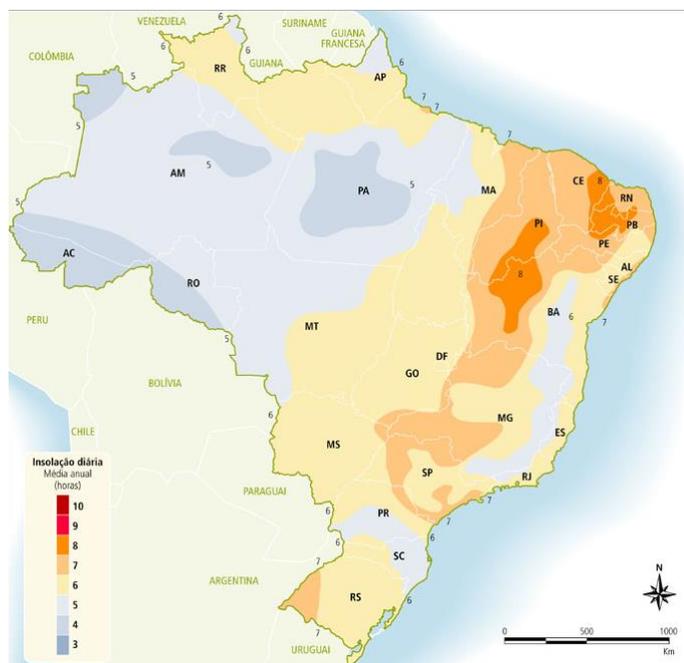
A energia solar, além de ser um recurso inesgotável, tem a vantagem de ser menos irregular que a energia eólica. O potencial brasileiro de exploração da energia solar é muito

grande, porém a quantidade de energia elétrica produzida pelos módulos fotovoltaicos depende da insolação no local de sua instalação.

A energia solar total incidente depende de condições atmosféricas, da latitude do local e da posição no tempo, ou seja, hora e dia do ano. Em virtude dos movimentos de translação e rotação da Terra, a duração solar varia ao longo do dia. Além disso, grande parte da radiação incidida sobre a Terra é absorvida e refletida pela atmosfera. Mesmo assim, acredita-se que a energia solar incidente seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial.

O Brasil está localizado próximo à linha do Equador, região do planeta que não sofre grandes variações na duração solar do dia, e por isso apresenta taxas de insolação médias anuais de 4.500 a 6.000 Wh/m<sup>2</sup>. As regiões Centro-Oeste e Nordeste apresentam os maiores potenciais de aproveitamento da energia solar, no entanto todas as demais áreas recebem radiação solar suficiente para produção de energia elétrica. O mapa da figura 10 mostra a média anual de insolação diária no Brasil em horas, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil.

Apesar das dimensões territoriais, das condições climáticas e seu grande potencial na geração de energia fotovoltaica, o Brasil ainda não produz metade da sua capacidade. Porém, investimentos em tecnologia vêm sendo feitos para que a energia fotovoltaica seja de fato uma alternativa considerável na matriz energética brasileira.



**Figura 10 – Média anual de insolação diária no Brasil**

**Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000.**

### **2.2.3 Incentivos à energia solar**

A primeira empresa fabricante de módulos fotovoltaicos do Brasil surgiu em 1979, na cidade de São Paulo, por consequência do início da crise do petróleo, em 1973. Todavia, foi nos anos de 2011 e 2012 que ocorreram avanços importantes nesse setor, após discussões geradas pelo grupo setorial de energia fotovoltaica da ABINEE e pela comissão de estudos CE-03:082.01 do COBEI, o qual é responsável pela criação da norma que regulariza a conexão de inversores fotovoltaicos à rede elétrica. As discussões tiveram o objetivo de promover a energia fotovoltaica, propor mecanismos e discutir regras de isenção, normas e regulamentos, facilitando principalmente os avanços dos sistemas de geração fotovoltaica de baixa tensão (VILLALVA; GAZOLI, 2014).

Em abril de 2012, a ANEEL publicou a resolução nº 482, a qual autoriza a micro e minigeração de energia elétrica, a partir de fontes alternativas com sistemas de geração distribuídas conectados às redes elétricas de baixa tensão, cria um sistema de compensação de energia para consumidores atendidos pelas distribuidoras de eletricidade e exige que as concessionárias adequem seus sistemas comerciais e elaborem normas técnicas referentes ao acesso dos sistemas de autoprodução de eletricidade (VILLALVA; GAZOLI, 2014).

Outro importante fator para a inserção da energia fotovoltaica na matriz energética brasileira foi a criação do projeto “Arranjos técnicos e comerciais para a inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”, em 2011. Com esse projeto, a ANEEL, em parceria com as distribuidoras de energia elétrica, pretendia incentivar a criação de usinas experimentais interligadas ao sistema elétrico nacional (VILLALVA; GAZOLI, 2014).

Atualmente algumas normas estão em vigor, como a NBR 16149 (Sistemas fotovoltaicos – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição), a NBR 16150 (Sistemas fotovoltaicos - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade) e a NBR 16274 (Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho). Essas normas definem regras que permitem o uso de qualquer fonte renovável para geração de energia elétrica em usinas de mini e microgeração conectadas à rede distribuidora. As normas também definem o critério de créditos pela energia gerada superior ao seu consumo. O prazo de validade desses créditos é de 60 meses, visto que o consumidor pode usá-los em outros locais, desde que sejam vinculados ao mesmo titular e que estejam na mesma área de atendimento da rede de

distribuição. As normas também determinam que a energia gerada em um condomínio possa ser dividida entre os condôminos com porcentagens diferentes.

### **2.3 Sistemas híbridos**

Sistemas híbridos são sistemas que utilizam mais de uma fonte para gerar energia, aumentando sua complexidade e exigindo adaptações para otimizar seu uso e aumentar sua eficiência. Em geral, esses sistemas são aplicados em casos que visam atender um maior número de usuários, pois apresentam maior aproveitamento de recursos e minimizam os custos de produção, em comparação com sistemas que utilizam somente uma fonte de energia.

Os primeiros sistemas híbridos foram implantados na década de 1970 com o intuito de reduzir o consumo de óleo combustível e, conseqüentemente, os custos operacionais associados. Porém, a partir da década de 1990 o emprego desses sistemas ganhou o propósito de reduzir os danos ambientais. Atualmente, a utilização de sistemas híbridos vem ganhando cada vez mais espaço, com a finalidade de levar eletricidade a locais remotos ou mesmo abastecer pequenos sistemas de bombeamento de água.

A junção das fontes garante maior confiabilidade ao sistema e diminui consideravelmente a quantidade de baterias e geradores a diesel.

#### **2.3.1 Tipos de sistemas híbridos**

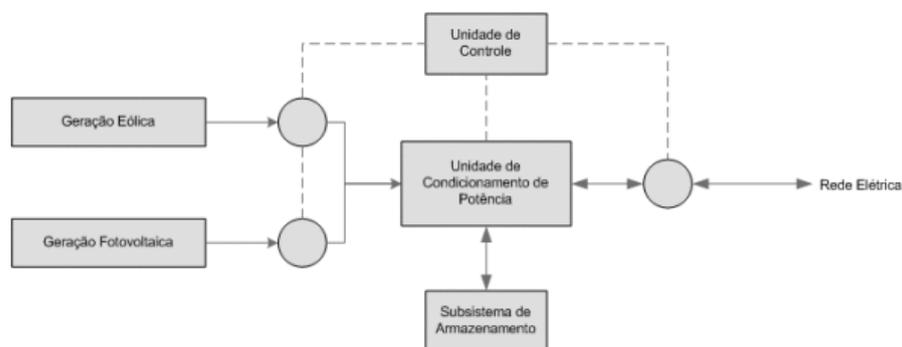
Os principais sistemas híbridos são:

- Sistema eólico-diesel: constituído por um aerogerador associado a um sistema de geração diesel-elétrica. As unidades geradoras a diesel são os componentes principais, enquanto a sistema de geração eólica atua com o objetivo de economizar combustível. Esse tipo de sistema híbrido é considerado o precursor dos demais sistemas.
- Sistema fotovoltaico-diesel: utilizam-se as fontes de geração solar e diesel-elétrica para geração de eletricidade. Sua constituição é semelhante ao sistema eólico-diesel, porém possui a vantagem de ter menor custo de equipamentos.
- Sistema fotovoltaico-eólico-diesel: opera de maneira similar aos sistemas anteriores, porém tem a vantagem de utilizar duas fontes alternativas de produção de energia elétrica, reduzindo o consumo de óleo diesel.
- Sistema eólico-fotovoltaico: combina fontes eólica e fotovoltaica, sem empregar recursos não renováveis, diminuindo os impactos ambientais.

### 2.3.2 Sistema híbrido eólico-fotovoltaico

A junção das fontes eólica e fotovoltaica no sistema híbrido supera uma das desvantagens da utilização de somente uma fonte para geração de energia: a periodicidade dos recursos. Durante o dia a radiação solar segue um padrão regular, amena no início da manhã, máxima por volta do meio-dia e decrescendo até o pôr-do-sol. Já o vento é um recurso imprevisível, porém há a possibilidade de existirem altas velocidades em períodos de baixa radiação solar, garantindo a continuidade da geração de energia elétrica.

A estrutura de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico pode variar de acordo com as especificações de cada projeto. A figura 11 exemplifica uma estrutura através de um diagrama de blocos genérico.



**Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema híbrido**

**Fonte: Heineman, 2007 – Estudo de viabilidade para implantação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de baixa potência com conexão à rede elétrica.**

O sistema híbrido eólico-fotovoltaico necessita de unidades de controle e monitoramento de potência para assegurar a redução dos custos operacionais e sua confiabilidade.

Segundo Pinho (2008, p.187), essas unidades deverão possuir as seguintes características:

- Possibilidade de medição de grandezas elétricas, como tensão, corrente e frequência de operação, e outras grandezas como temperatura dos módulos e baterias, velocidade e direção dos ventos, densidade do ar e irradiância.
- Ajuste do ciclo de carga e descarga das baterias para evitar a diminuição do seu ciclo de vida útil.
- Possuir um sistema capaz de guardar os dados do monitoramento.
- Possuir um sistema de proteção e alerta para prevenir imprevistos.

- Controle e previsão das condições operacionais em tempo real.
- Envio de informações via protocolo de comunicação.

O projeto de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico será demonstrado a seguir de acordo com o estudo de caso proposto por esse trabalho.

### **3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

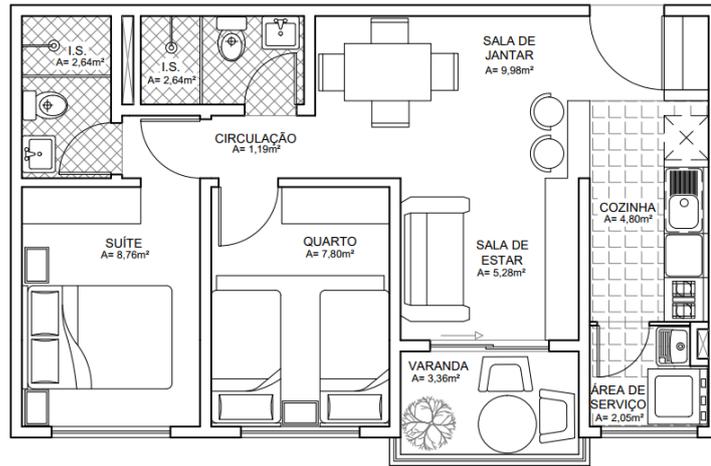
Logo após a pesquisa realizada sobre os sistemas alternativos de geração de energia elétrica, um estudo de caso foi desenvolvido com o intuito de analisar uma situação real de consumo de energia e verificar a aplicação e viabilidade do sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Dessa maneira, sugere-se um caso hipotético de consumo energético de um conjunto residencial. O estudo de caso foi baseado em pesquisas que avaliaram tendências atuais de habitação e consumo de aparelhos eletrônicos.

#### **3.1 Fundamentos do estudo de caso**

Atualmente, a área dos imóveis vem diminuindo gradativamente e a procura pelos chamados “compactos”, pequenos apartamentos, está cada vez maior. O inchaço das grandes cidades e a falta de espaço para construção, a redução do número de filhos por casal e o valor excessivo dos imóveis são os principais motivos para que a procura por lugares menores ocorra. Além disso, conceitos como mobilidade, simplicidade, otimização de espaços e serviços compartilhados são cada vez mais comuns por tornarem a vida mais simples e moderna.

A área média dos imóveis diminuiu de aproximadamente 100m<sup>2</sup> nos anos 1970 para 58,4m<sup>2</sup> em 2014. Conforme esse fato, para esse trabalho foram considerados apartamentos com cerca de 55m<sup>2</sup>, sendo os cômodos: quarto, suíte, banheiro, sala, cozinha e área de serviço, conforme figura 12.

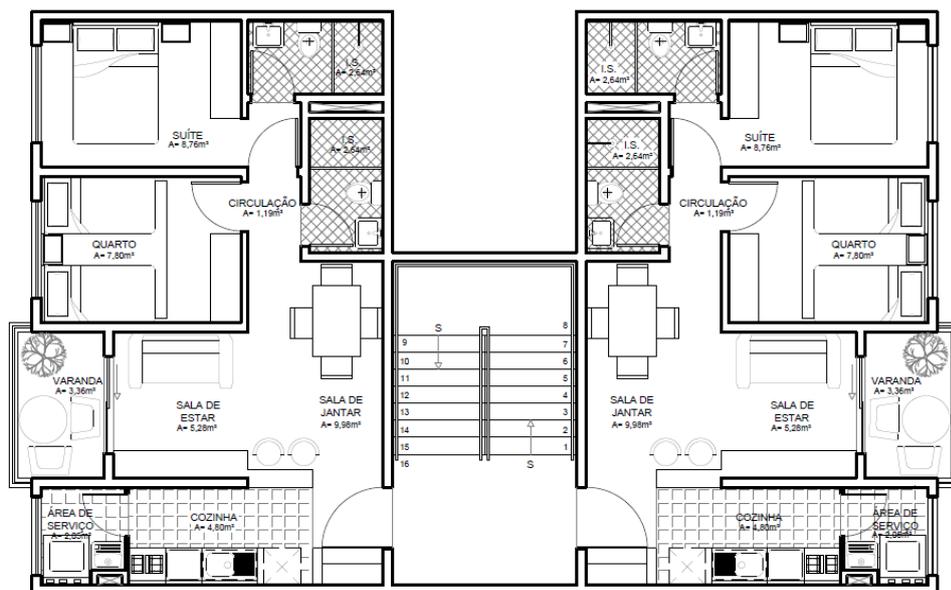


**Figura 12 – Planta baixa de apartamento de 55m<sup>2</sup>**

**Fonte – Elaborado pelo autor**

Também, segundo dados do IBGE, o número médio de filhos por família é de 1,6 filhos. Além disso, apesar do padrão de família ainda ser casal com filhos, houve um aumento no número de famílias com mulheres sem cônjuge e com filhos, de casais sem filhos e de pessoas que vivem sozinhas. Assim, admite-se para efeito de análise uma média de três pessoas por apartamento.

Dessa forma, o conjunto residencial proposto baseia-se em uma edificação com dez pavimentos, sendo dois apartamentos por andar, segundo a figura 13, semelhantes ao descrito anteriormente. O dimensionamento de consumo de energia elétrica será feito a seguir, considerando as características mencionadas.



**Figura 13 – Planta baixa do pavimento-tipo**

**Fonte – Elaborado pelo autor**

### 3.2 Dimensionamento do consumo de energia elétrica

Após uma pesquisa entre as distribuidoras de energia elétrica no Brasil com o intuito de obter valores de consumo de energia elétrica próximos da realidade, o dimensionamento de carga da edificação proposta foi feito utilizando o simulador de consumo disponibilizado pelo Grupo Energisa em seu site, por ser o mais funcional e objetivo, uma vez que permite o cálculo de um valor aproximado do consumo de energia elétrica inserindo os eletrodomésticos que o cliente possui em cada cômodo de seu imóvel.

O cálculo do consumo mensal de energia elétrica no simulador é feito inserindo os eletrodomésticos que o cliente possui em cada cômodo do imóvel, juntamente com a quantidade de aparelhos, o tempo de consumo e a potência de cada aparelho. Como resultado, o simulador retorna o consumo aproximado de energia elétrica em kW h, o valor total a ser pago, o cálculo de impostos e o adicional de bandeiras tarifárias. Nos cálculos do simulador de consumo disponibilizado pelo site do Grupo Energisa é considerada uma tarifa residencial no valor de R\$0,5068 e o valor tarifário adicional considera a bandeira vigente no momento do cálculo.

Dessa forma, foram inseridos na simulação de consumo os aparelhos considerados mais comuns nas residências brasileiras que se enquadram na categoria D, segundo a classificação do IBGE das classes sociais pelo critério de faixas de salário mínimo, que possui uma renda familiar de R\$1.874,01 a R\$3.748,00. A tabela 1 apresenta a estimativa dos eletrodomésticos e demais aparelhos, bem como seu consumo em Watts, os tempos estimados de consumo e o consumo diário de Watts-hora.

Quantidade	Equipamento	Consumo W		Horas de uso/dia	Consumo W por dia	Consumo em kWh
		Unitário	Total			
9	Lâmpada LED	15	135	1,5	202	6,12
3	Carregador de celular	15	45	2	90	0,90
1	Notebook	100	100	1	100	3,00
1	Ventilador	65	65	1	65	1,95
1	Secador de cabelo	800	800	0,1	80	2,40
1	Televisor	90	90	3	270	8,10
1	Modem	15	15	24	360	10,80
1	Microondas	1.200	1.200	0,1	120	3,60
1	Liquidificador	300	300	0,1	30	0,90
1	Geladeira	200	200	8	1.600	48,00
1	Ferro de passar	1.000	1.000	0,1	100	3,00
1	Máquina de lavar	500	500	1	500	15,00

**Tabela 1 – Consumo de aparelhos eletrônicos por apartamento**

**Fonte – Elaborado pelo autor**

Na simulação, optou-se por usar lâmpadas de LED com potência de 15W, uma vez que são mais eficientes e econômicas que as demais lâmpadas existentes no mercado. O consumo dos chuveiros não foi considerado nestes cálculos, uma vez que sistemas de aquecimento solar podem ser utilizados como forma alternativa de economia de energia elétrica.

A legislação brasileira exige que haja acesso de pessoas portadoras de necessidades especiais a todas as áreas comuns de prédios residenciais, garantido por meio de rampas ou elevadores. Prédios com mais de quatro andares tem a obrigação de receber elevadores, assim a edificação proposta deverá ter um elevador, porém alimentado por um grupo motor-gerador para que a carga não seja considerada nos cálculos.

O consumo de outros equipamentos eletrônicos presentes em áreas comuns do condomínio também foram considerados, de acordo com a tabela 2.

Quantidade	Equipamento	Consumo W		Horas de uso/dia	Consumo W por dia	Consumo em kWh
		Unitário	Total			
20	Lâmpada LED	15	300	10	3.000	90
10	Sensor de presença	10	100	10	1.000	30
1	Portão eletrônico	370	370	3	1.110	33,3
1	Bomba d'água	2.200	2.200	2	4.400	132

**Tabela 2 – Consumo de aparelhos eletrônicos em áreas comuns**

**Fonte – Elaborado pelo autor**

De acordo com as tabelas, o consumo médio por apartamento será de 103,77kWh/mês e o consumo das áreas comuns de 285,30kWh/mês, totalizando uma demanda de 2.360,7kWh/mês para todo o condomínio.

A seguir, é feito o projeto de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico considerando o consumo dimensionado por meio desse estudo de caso.

### **3.3 Projeto do sistema híbrido eólico-fotovoltaico**

#### **3.3.1 Análise do recurso disponível**

A primeira etapa do projeto de um sistema híbrido é a análise dos recursos naturais disponíveis no local em que se deseja implantá-lo. Uma análise preliminar deverá ser feita utilizando-se, primeiramente, dados obtidos em atlas eólicos e solarimétricos e estações meteorológicas próximas. Após essa análise, é importante que se faça uma visita ao local

visando observar os indicadores naturais, como a vegetação, e captar mais dados confiáveis através de instrumentos portáteis de medição e até mesmo de conversas com moradores locais. Nessa etapa, observa-se também a acessibilidade ao local e a disponibilidade das áreas de instalação.

A seguir, são instalados os equipamentos de monitoração, sob a forma de uma estação meteorológica. A torre deve ser instalada em um local viável para operação dos sensores, como anemômetros, piranômetros e anemoscópios. Os dados coletados pelos sensores são tratados e analisados e, então, é concluída e constatada a viabilidade da instalação do sistema híbrido.

Para análise do recurso solar, é imprescindível que se tenha conhecimento dos dados de radiação solar, pois o custo da energia produzida pelos geradores fotovoltaicos determina a viabilidade econômica do sistema. A quantidade e a distribuição do recurso solar, juntamente com as características de conversão dos dispositivos fotovoltaicos, determinam a quantidade de energia disponível para o atendimento da carga (PINHO, 2013).

Os dados solarimétricos medidos são apresentados em termos de energia por unidade de área (irradiação) ou potência por unidade de área (irradiância). A irradiância é representada em termos do número de horas de sol pleno, ou seja, número de horas diárias em que a irradiância equivale a  $1\text{kW/m}^2$ , segundo o total incidente no dia ( $\text{kWh/m}^2$ ).

A análise do recurso eólico inclui o estudo de parâmetros como fatores geográficos, dados de velocidade e direção do vento, altura de instalação do sistema e dados de temperatura e pressão atmosférica. Alguns parâmetros a respeito do vento devem ser conhecidos para determinar o rendimento e o custo da implantação do sistema eólico no local, que incluem velocidade média do vento, direção, variações diárias e anuais, variações sazonais e variações em torno da média em curtos intervalos de tempo, específicos de cada local.

Neste trabalho, não será feita a análise dos recursos solar e eólico, pois não tem o objetivo de propor a instalação do sistema híbrido em um local específico. Para o estudo de caso, considera-se ideal o local de instalação do sistema, tomando como objetivo o estudo da viabilidade em atender a carga dimensionada anteriormente.

### **3.3.2 Dimensionamento do sistema híbrido**

Após a avaliação dos recursos naturais disponíveis e a constatação da viabilidade da instalação dos sistemas de geração no local, analisa-se a demanda exigida. Deve-se considerar

o aumento da carga atendida para que a oferta de energia seja garantida. Além disso, é importante que haja medidas de eficiência energética e uso consciente da energia pelos consumidores.

O valor da demanda de energia elétrica local, sua distribuição ao longo do dia e as perspectivas futuras de ampliação do consumo são parâmetros que influenciam no tamanho, na otimização do uso e até mesmo na viabilidade técnico-econômica do sistema (PINHO, 2014).

O projeto do sistema híbrido deve ser feito com o intuito de atender grande parte da demanda necessária, levando em conta a periodicidade dos recursos naturais, garantindo a continuidade da geração de energia elétrica. Como dito anteriormente, este trabalho não tem o objetivo de propor a instalação do sistema em um local específico, assim os dados de irradiação solar e velocidade do vento serão considerados ideais para produção da energia elétrica suficiente para atender parte da demanda de carga calculada.

Devido ao fato do vento ser um recurso natural intermitente e menos previsível que a irradiação solar, considera-se neste trabalho que a participação da fonte solar seja maior que a fonte eólica. A demanda calculada anteriormente para o estudo de caso é de 2.360,7kWh/mês para todo o condomínio. A geração de energia solar será usada para suprir cerca de 80% dessa demanda, ou seja, 1.888,6kWh/mês. O restante será atendido pelos geradores eólicos, 472,1kWh/mês.

Foram considerados nos cálculos um índice solarimétrico do local de 5kWh/m<sup>2</sup>/dia e uma eficiência de 83% das placas fotovoltaicas, devido às perdas na geração e transmissão de potência.

Dessa forma, para o dimensionamento da quantidade de placas fotovoltaicas necessárias para o projeto, foram feitos os seguintes cálculos:

Demanda de potência mensal: 1.888,6kWh/mês ou 1.888.600Wh/mês.

Demanda de potência diária: 1.888.600Wh/mês / 30 dias = 62.953,3Wh/dia.

Potência necessária de geração das placas: 62.953,3Wh/dia / 5kWh/m<sup>2</sup>/dia = 12.590,7W.

Eficiência das placas: 12.590,7W / 0,83 = 15.169,5W.

Dessa forma, a potência produzida pelas placas fotovoltaicas para suprir 80% da demanda de carga da edificação proposta é de 15.169,5W. Sugere-se a utilização de painéis de

silício policristalino e potência máxima de 320W. Assim, são necessárias aproximadamente 48 placas com características iguais para atender a demanda de energia.

A geração eólica abastecerá o restante da demanda de carga exigida, 472,1kWh/mês. Assim, os cálculos foram feitos baseados em um modelo de aerogerador disponível no mercado com as seguintes especificações:

Diâmetro do rotor (D): 3,8 metros

Coefficiente aerodinâmico de potência do rotor ( $C_p$ ): 0,45

Eficiência do gerador ( $\eta$ ): 80%

A potência elétrica, em watts, produzida pelo aerogerador é calculada segundo a função:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_r \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta$$

sendo  $A_r$  a área varrida pelo rotor, dada por:

$$A_r = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Foram considerados valores médios de velocidade,  $v$ , de 7 m/s e densidade do ar,  $\rho$ , 1,225kg/m<sup>3</sup>. Assim:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta$$
$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225\text{kg/m}^3 \cdot \frac{\pi \cdot (3,8\text{m})^2}{4} \cdot (7\text{m/s})^3 \cdot 0,45 \cdot 0,8$$
$$P = 857,75\text{W}$$

Como a demanda de carga a ser atendida pela geração eólica é de 15.970W, serão necessários 19 aerogeradores com as mesmas características para garantir o atendimento dessa demanda.

Para especificar o inversor do sistema, considera-se tanto a tensão de entrada dos equipamentos (CC) quanto a tensão de saída (CA). Eles são dimensionados de acordo com a potência elétrica que deverá suprir em operação normal por determinado tempo e a capacidade de surto dos equipamentos que compõem a carga.

Equipamentos que exigem altos valores de corrente de partida, como motores elétricos, devem merecer atenção especial no dimensionamento, para que o inversor possa fornecer, durante um curto intervalo de tempo, a potência necessária para acionar esses equipamentos. Outro fator importante na especificação é que devem ser observadas todas as

exigências que a carga fará ao inversor, não somente em relação à potência, mas também em relação à variação de tensão, à frequência e à forma de onda de tensão de saída.

Além disso, a eficiência do inversor é um parâmetro importante na escolha, valores abaixo de 90% de eficiência representam perdas excessivas que comprometem a viabilidade do projeto. Sua instalação é feita entre os sistemas geradores e o ponto de fornecimento da rede, recebendo a energia gerada em corrente contínua e convertendo em energia alternada, sincronizando e injetando na rede elétrica. O dimensionamento dos condutores elétricos, disjuntores, chaves, fusíveis e demais componentes elétricos que compõem o sistema deve seguir os critérios adotados na norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão.

O sistema proposto neste trabalho dispensa o uso de baterias, pois, além de encarecer o projeto, não são necessárias uma vez que há a possibilidade de interligação com a rede. Nos sistemas *on grid*, quando a geração do sistema híbrido é superior à demanda, o sistema devolve energia para a rede, podendo ser utilizada para compensar o consumo de outras unidades previamente cadastradas e atendidas pela mesma distribuidora, desde que o titular seja o mesmo da unidade com sistema de compensação de energia. O controle da geração é realizado pelo medidor bidirecional de energia do consumidor, que mede a entrada e saída de energia. Quando a geração é inferior à demanda, a distribuidora supre a diferença de energia automaticamente. Assim, nem toda a carga necessária para abastecer a edificação será fornecida pelo sistema híbrido todo o tempo, mas haverá a diminuição significativa da energia fornecida pela rede de distribuição.

#### **4 RESULTADO E ANÁLISE**

Após feitos os cálculos para dimensionamento do sistema híbrido, segundo a demanda de carga necessária para suprir o consumo energético da edificação proposta, observa-se que o número de placas e aerogeradores é muito grande. Apesar da eficiência dos equipamentos e do benefício de se obter energia proveniente de fontes infinitas e limpas, a área necessária para implantação do sistema híbrido, devido à quantidade de placas e aerogeradores, deverá ser muito grande.

A possibilidade de uma edificação, como a proposta no estudo de caso, que visa espaços mais compactos, ter uma área capaz de conter todos esses equipamentos é praticamente nula.

Assim, sugere-se para essa situação o uso de um novo conceito de produção compartilhada de energia elétrica provenientes de fontes renováveis, os condomínios solares,

empreendimentos capazes de gerar energia em grande escala em locais com altos índices solarimétricos, pouca precipitação pluviométrica, ventos constantes e, normalmente, com solos inférteis para agricultura.

O principal objetivo do condomínio solar é possibilitar o compartilhamento dos benefícios dessa energia entre as pessoas que não dispõem de uma área suficiente para instalação dos sistemas ou preferiram não instalar painéis solares em sua propriedade.

A configuração jurídica de um condomínio pode ser formatada via cooperativa ou consórcio. A Resolução Normativa 687/15 da ANEEL define o autoconsumo remoto e geração compartilhada como formas que possibilitam o modelo de condomínio solar.

Os condomínios solares possibilitam a compra de painéis fotovoltaicos individuais ou a compra de um lote solar, de acordo com a capacidade instalada ou por quantidade de energia produzida. A geração de energia do lote solar se transforma em créditos aos investidores em proporção ao seu investimento. Esse crédito de energia é descontado na conta de energia do proprietário do lote.

Além disso, os condomínios solares podem também receber aerogeradores, que potencializam a produção de energia elétrica.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O uso de recursos naturais para geração de energia elétrica é cada vez mais recorrente e necessário. As fontes eólica e solar possuem grande potencial de aproveitamento para geração de energia e, aliadas em um sistema híbrido, podem aumentar e otimizar essa produção.

Assim, segundo a análise feita nesse trabalho, constata-se a não viabilidade da instalação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico na edificação proposta devido à grande demanda de carga, à quantidade de equipamentos necessária e à falta de espaço para instalação do sistema. Para consumos de carga menores, como em residências unifamiliares, a utilização do sistema apresenta-se viável.

Para grandes demandas de carga há a possibilidade do uso de condomínios solares, que possibilitam o compartilhamento da energia entre os consumidores que não dispõem de uma área suficiente para instalação dos sistemas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Eliane; ROSA, Anna Clara; DIAS, Fernanda Cristina Lima Sales. **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica**. 2012. 13 f. Monografia - Curso de Engenharia Biométrica, Fumec, Belo Horizonte, 2012.
- ALTERNATIVA, Solarterra - Soluções em Energia. **Energia Solar Fotovoltaica - Guia Prático**. São Paulo: Solarterra, 2011.
- AMARANTE, Odilon A. Camargo do. **Atlas Eólico - Minas Gerais**. Belo Horizonte: Cdd, 2010.
- AMARANTE, Odilon Camargo do. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Cresesb, 2001.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: Aneel, 2005.
- BRAGA, Renata Pereira. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008. 67 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br>>. Acesso em: 08 fev. 2017.
- CARNEIRO, Joaquim. **Electromagnetismo B - Módulos Fotovoltaicos - Características e Associações**. 2010. 18 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Azurém, 2010.
- CARNEIRO, Thiago Rodrigo Alves. **Faixas Salariais x Classe Social - Qual a sua classe social**. Disponível em: <<https://thiagorodrigo.com.br/artigo/faixas-salariais-classe-social-abep-ibge/>>. Acesso em: 17 ago. 2017.
- CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/Resumo do Atlas Solarimetrico.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/Resumo_do_Atlas_Solarimetrico.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2017.
- CEMIG. **Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária - Rede de distribuição secundária**. Belo Horizonte: Diretoria de Distribuição e Comercialização, 2013.
- CEMIG. **Simulador de consumo**. Disponível em: <[https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Documents/SimuladorDeConsumo/Cemig - Estime seu Consumo2.htm](https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Documents/SimuladorDeConsumo/Cemig_-_Estime_seu_Consumo2.htm)>. Acesso em: 21 fev. 2017.
- DESENVOLVIMENTO, Comissão Mundial Sobre O Meio Ambiente e O. **Our Common Future**. Noruega: Oxford University Press, 1987.
- DUTRA, Ricardo. **Energia Eólica - Princípios e Tecnologia**. São Paulo: Cresesb, 2008.
- ELÉTRICA, Agência Nacional de Energia. **Energia Solar**. São Paulo: Aneel, 2005.

ENERGISA. **Simulador de consumo**. Disponível em: <<http://www.energisa.com.br/Paginas/simulador-de-consumo.aspx>>. Acesso em: 21 fev. 2017.

ESTATÍSTICA, Instituto Brasileiro de Geografia e. **A família brasileira**. Disponível em: <<http://teen.ibge.gov.br/biblioteca/274-teen/mao-na-roda/1770-a-familia-brasileira.html>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

FILIPPE, Diego Barbosa Leite; LOBATO, Emanuel de Melo; QUINTAN, Vinícius Contilio. **Energia Eólica - Análise sobre o potencial eólico brasileiro**. Rio de Janeiro: Uff, 2013.

GAZOLI, Jonas Rafael; VILLALVA, Marcelo Gradella; GUERRA, Juarez. Energia solar fotovoltaica - Introdução. **Energias Renováveis Alternativas**, Campinas, v. 2, n. 5, p.48-59, mar. 2014.

GERAIS, Companhia Energética de Minas. **Alternativas energéticas - Uma visão CEMIG**. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

GUIMARÃES, Gabriel. **Inversor solar: tudo que você precisa saber**. Disponível em: <<http://www.solarvoltenergia.com.br/inversor-solar-tudo-que-precisa-saber/>>. Acesso em: 01 fev. 2017

IDEAL, Instituto. **Guia de microgeradores eólicos**. Disponível em: <<http://institutoideal.org/guiaeolica/>>. Acesso em: 17 mar. 2017.

LAGE, Elisa Salomão; PROCESSI, Lucas Duarte. **Panorama do setor de energia eólica**. Brasília: Bndes, 2013.

LOPES, Noêmia. **Brasil pode ter 6 vezes o potencial eólico estimado**. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/brasil-pode-ter-6-vezes-o-potencial-eolico-estimado/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

MACEDO, Wilson Negrão. **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2006. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. 132 f. Monografia - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MRMECON. **Entenda como funciona**. Disponível em: <<http://www.mrmecon.com.br/energia/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel – Cresesb, 2014.

PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

POWER, Sunlab. **Dimensionamento de sistema solar autônomo (off grid)**. Disponível em: <[http://www.sunlab.com.br/Dimensionamento\\_solar\\_fotovoltaico.htm](http://www.sunlab.com.br/Dimensionamento_solar_fotovoltaico.htm)>. Acesso em: 19 ago. 2017.

RENOVÁVEL, Atomra Energia. **Cálculo do Dimensionamento Projeto Solar Fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.atomra.com.br/dimensionamento-projeto-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 21 ago. 2017.

SERRÃO, Marcos Antônio dos Santos. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma casa de veraneio em Pouso da Cajaíba - Paraty**. 2010. 89 f. Monografia - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TIBA, Chigueru. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife: Ed Universitária da Ufpe, 2000.