

MEC – SETEC  
INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS – CAMPUS FORMIGA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UMA MICRORREDE EM  
UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL UTILIZANDO GERAÇÃO EÓLICA  
E SOLAR**

Natália Rodrigues de Melo

Orientador: Prof. Msc. Rafael Vinícius

Tayette Da Nobrega

FORMIGA – MG

2016

NATÁLIA RODRIGUES DE MELO

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UMA MICRORREDE EM  
UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL UTILIZANDO GERAÇÃO EÓLICA  
E SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Msc. Rafael Vinicius Tayette da  
Nobrega

**FORMIGA – MG**

**2016**

621.3  
M528d      Melo, Natália Rodrigues de  
                Dimensionamento e simulação de uma microrrede em um condomínio  
                residencial utilizando geração eólica e solar / Natália Rodrigues de Melo.--  
                Formiga : IFMG, 2016.  
                78 p. : il.

                Orientador: Ms. Rafael Vinícius Tayette de Nobrega  
                Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de  
                Minas – *Campus* Formiga.

                1. Microrredes. 2. Demanda. 3. *Software* Homer 4. Fontes renováveis .  
I. Título.

CDD 621.3

NATÁLIA RODRIGUES DE MELO

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UMA MICRORREDE EM  
UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL UTILIZANDO GERAÇÃO EÓLICA  
E SOLAR**

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Msc. Rafael Vinícius Tayette da Nobrega

---

Prof. Msc. Ana Paula Lima dos Santos

---

Prof. Msc. Gustavo Lobato Campos

Formiga 24 de novembro de 2016.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, meu melhor amigo e maior ouvinte, por ter me sustentado durante essa caminhada e não permitir que eu desanimasse diante das dificuldades.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG e a todos os funcionários e professores, que tanto contribuíram para minha formação. Obrigada pela dedicação e comprometimento para com os alunos.

Ao meu orientador, Rafael Vinícius Tayette da Nobrega, por todo apoio prestado e pela disponibilidade em me atender e sanar minhas dúvidas.

À minha família, os principais incentivadores desse sonho. A minha mãe Solange, por sempre me apoiar nas minhas decisões e pelas inúmeras orações. Ao meu pai Walter, por sempre me deixar livre para seguir minhas escolhas, mas sempre me indicando o caminho certo. Ao meu irmão Junior, pela prontidão em me ajudar em tudo que precisei. Vocês são minha base, obrigada por tudo!

Ao meu namorado Thiago, que compartilhou comigo esse momento, pela paciência durante minhas ausências e por estar ao meu lado sempre me apoiando.

A todos os meus amigos, que fizeram com que essa jornada se tornasse mais fácil através dos momentos de descontração e incentivos, em especial a minha amiga Isabel Ramos Henriques Oliveira, pelas inúmeras horas de estudo e por se fazer presente durante essa caminhada.

Essa vitória não é só minha, mas de todos vocês!

## RESUMO

Uma microrrede pode ser definida como um sistema de geração de energia de pequeno porte, contendo unidades geradoras distribuídas que normalmente utilizam diferentes fontes de energia, para atender um determinado número de consumidores. No Brasil, existem alguns fatores que têm contribuído para uma maior inserção das microrredes no sistema elétrico, podendo-se destacar a crise hídrica, a existência de centros de consumo afastados do sistema de transmissão e/ou distribuição, questões ambientais e elevado potencial das fontes renováveis no país. Este trabalho tem como objetivo principal dimensionar e simular uma microrrede que utiliza as fontes renováveis eólica e solar, juntamente com um sistema de armazenamento de energia, para atender a demanda de um condomínio que contém trinta e seis residências, na cidade de Janaúba/MG, sendo que a escolha foi feita baseando-se no seu alto potencial eólico e solar. A simulação do projeto foi realizada por meio do *software* HOMER, que é uma ferramenta computacional *open source* especializada na análise de microrredes. Analisando os valores de irradiância solar e velocidade do vento locais, pôde-se concluir que a região apresenta potencial eólico superior ao solar. Assim, o sistema foi dimensionado satisfatoriamente sendo 66,5% de sua demanda total fornecida pelo sistema eólico e os 33,5% restantes pelo sistema solar.

**Palavras-Chave:** Microrredes, Demanda, *Software* HOMER, Fontes renováveis.

## ABSTRACT

Microgrids can be defined as a small power generation system with distributed generation units that typically include energy resources, to meet a pre-defined number of consumers. In Brazil, some factors have contributed to expand the integration of microgrids in electrical system, such as hydro crisis, the existence of consumers living away from the transmission or distribution system, environmental issues, and high potential of renewable resources detected in the country. The main objective of this paper is the design and simulation of a microgrid that includes wind and solar systems, combined with a storage energy system to meet the demand of a condominium that contains thirty six residences, located at Janaúba/MG, which was chosen based in its wind and solar potential. The project simulation was performed by the software HOMER, which is an open source computational tool, focusing in microgrids analysis. Analyzing the solar irradiance and wind speed local values, it turned out that the wind potential is greater than solar in that area. Therefore, the system has been successful designed, whereas 66.5% of its total demand will be provided by the wind system, and the solar system will be responsible for the 33.5% remaining.

**Keywords:** Microgrids, Demand, Software HOMER, Renewable Resources.

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Potência do vento.....	35
Equação 2 - Número de turbinas eólicas para o sistema eólico.....	58
Equação 3 - Potência do sistema fotovoltaico.....	59
Equação 4 - Energia produzida diariamente por um módulo fotovoltaico.....	59
Equação 5 - Número de módulos para o sistema fotovoltaico.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta de potência de energia elétrica no ano de 2015. Figura extraída de (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).....	14
Figura 2 - Emissões de CO <sub>2</sub> por fonte e por setor brasileiro, em porcentagem, para os anos de 2014 e 2015. Figura extraída de (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).....	15
Figura 3 - Nível de armazenamento do sistema Cantareira, mostrando a evolução de 2010 a 2015. Figura extraída de (PEGORIM, 2016).....	16
Figura 4 - Investimentos em energias renováveis no Brasil, no período de 2004 a 2014. Figura extraída de (REN21, 2015). .....	17
Figura 5 - Representação esquemática das partes constituintes de uma microrrede. Figura extraída de (RAYTHEON, 2015). .....	22
Figura 6 - Desenho esquemático de uma turbina eólica de eixo horizontal. Figura adaptada de (CBEE, 2002).....	33
Figura 7 - Principais tipos de turbinas eólicas: (a) <i>Upwind</i> HAWT; (b) <i>Downwind</i> HAWT; (c) Darrieus VAWT. Figura extraída de (MASTERS, 2004).....	34
Figura 8 - Crescimento do tamanho de uma turbina eólica comercial típica. Figura extraída (IPCC, 2012). .....	35
Figura 9 - Países/regiões com mais de 4 GW de capacidade total instalada até Junho/2015. Figura extraída de (WWEA, 2015).....	37
Figura 10 - Representação esquemática de: célula, módulo e arranjo fotovoltaico. Figura extraída de (ALMEIDA, 2012).....	39
Figura 11 - Esquema de um sistema fotovoltaico domiciliar. Figura extraída de (CEPEL; CRESESB, 2014).....	40
Figura 12 - Influência da radiação solar na corrente elétrica de um célula fotovoltaica a 25°C. Figura extraída de (CEPEL; CRESESB, 2014). .....	41
Figura 13 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (irradiância de 1.000 W/m <sup>2</sup> ). Figura extraída de (CEPEL; CRESESB, 2014). .....	42
Figura 14 - Radiação solar direta normal diária média anual para o estado de Minas Gerais. Figura extraída de (CEMIG, 2012).....	45

Figura 15 - Áreas mais promissoras para geração eólica em Minas Gerais. Figura extraída de (CEMIG, 2010). .....	47
Figura 16 - Fluxograma mostrando o funcionamento do <i>software</i> HOMER .....	49
Figura 17 - Relação conceitual entre simulação, otimização e análise de sensibilidade. Figura extraída de (LAMBERT <i>et al.</i> , 2006). .....	50
Figura 18 - Arquitetura de microrrede criada no <i>software</i> HOMER. ....	51
Figura 19 - Irradiância média diária para a cidade de Janaúba. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	52
Figura 20 - Velocidade média anual do vento em Janaúba. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	53
Figura 21 - (a) Consumo diário do condomínio em kW. (b) Máxima demanda mensal solicitada em kW. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	53
Figura 22 - Quantidade e potência dos componentes utilizados na análise de sensibilidade. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	54
Figura 23 - Resultados obtidos para o número de moradores por residência, através de um programa de sorteio aleatório desenvolvido no MATLAB. ....	55
Figura 24 - Energia mensal gerada pela turbina em função da velocidade média anual do vento. Figura extraída de (SOUTHWEST WINDPOWER, 2012). ....	57
Figura 25 - O sistema <i>Ingecon Hybrid MS</i> indicando suas entradas e saídas. Figura extraída de (INGETEAM, 2016). ....	61
Figura 26 - Solução ideal calculada pelo HOMER. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	63
Figura 27 - Produção média mensal de energia obtida das fontes eólica e solar. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	64
Figura 28 - Geração elétrica obtida pela microrrede. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	65
Figura 29 - Desempenho do sistema fotovoltaico. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	65
Figura 30 - Desempenho do sistema eólico. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	66
Figura 31 - Resultados obtidos para o inversor. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	66
Figura 32 - Resultados obtidos para o banco de baterias. Figura obtida através do <i>software</i> HOMER. ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Crescimento da matriz energética brasileira entre 2008 e 2015. ....	18
Tabela 2 - Custos referentes a microrrede com as fontes de energia eólica e solar. ....	52
Tabela 3 - Características da turbina eólica escolhida. ....	56
Tabela 4 - Velocidade média do vento para uma altura de 50 m. ....	57
Tabela 5 - Irradiação solar diária média para a cidade de Janaúba/MG. ....	58
Tabela 6 - Características elétricas do módulo. ....	59
Tabela 7 - Quantidade e custo estimado dos equipamentos da microrrede. ....	68

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problema.....	18
1.2	Justificativa.....	19
1.3	Hipótese.....	19
1.4	Objetivo Geral.....	20
1.5	Objetivos Específicos.....	20
1.6	Organização do texto.....	20
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	Geração Distribuída.....	21
2.1.1	Microrredes.....	22
2.1.2	Vantagens relacionadas às microrredes.....	23
2.1.3	Desafios e desvantagens relacionadas às microrredes.....	25
2.1.4	Microrredes no mundo.....	27
2.1.5	Microrredes no Brasil.....	29
2.2	Microfontes.....	32
2.2.1	Energia Eólica.....	32
2.2.1.1	Tipos de turbinas eólicas.....	34
2.2.1.2	Potência do vento.....	36
2.2.1.3	Potencial e produção eólica no Brasil.....	37
2.2.2	Energia Solar.....	38
2.2.2.1	Componentes de um sistema fotovoltaico.....	38
2.2.2.2	Influência da irradiância solar e da temperatura.....	41
2.2.3	Dispositivos armazenadores de energia.....	42
2.2.4	Sistemas <i>on-grid</i> e <i>off-grid</i> .....	43
2.2.5	Potencial solar e eólico de Minas Gerais.....	44
3.	METODOLOGIA DESENVOLVIDA.....	48

3.1	O <i>software</i> HOMER .....	48
3.1.1	Variáveis de entrada no <i>software</i> HOMER.....	51
3.2	Características do sistema de microrrede desenvolvido .....	54
3.3	Dimensionamento do sistema eólico .....	56
3.4	Dimensionamento do sistema fotovoltaico .....	58
3.5	O sistema <i>Ingecon Hybrid MS</i> .....	60
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
4.1	Resultados da simulação no <i>software</i> HOMER .....	63
4.2	Análise econômica do projeto .....	68
5.	CONCLUSÃO.....	70
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	72
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73

## 1. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é considerada uma das melhores do mundo devido ao alto potencial de recursos renováveis disponíveis no país, sendo que 87% da matriz brasileira é referente as fontes renováveis enquanto apenas 13% da matriz energética mundial possui participação em energias renováveis (GOMES, 2013).

As fontes de energia renováveis apresentam muitas vantagens quando comparadas com outras, podendo-se destacar a disponibilidade dos recursos, a facilidade da sua utilização e o fato de que elas estarão disponíveis na natureza por muito tempo. Entre as fontes renováveis, a hidráulica representa uma parcela significativa no Brasil (PORTAL BRASIL, 2014).

O sistema elétrico brasileiro atual possui uma alta dependência da geração de energia elétrica proveniente das hidrelétricas. O Brasil conta com mais de mil usinas hidrelétricas espalhadas pelo país, sendo responsáveis por aproximadamente 62,5% da produção de energia, conforme é mostrado na Figura 1 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

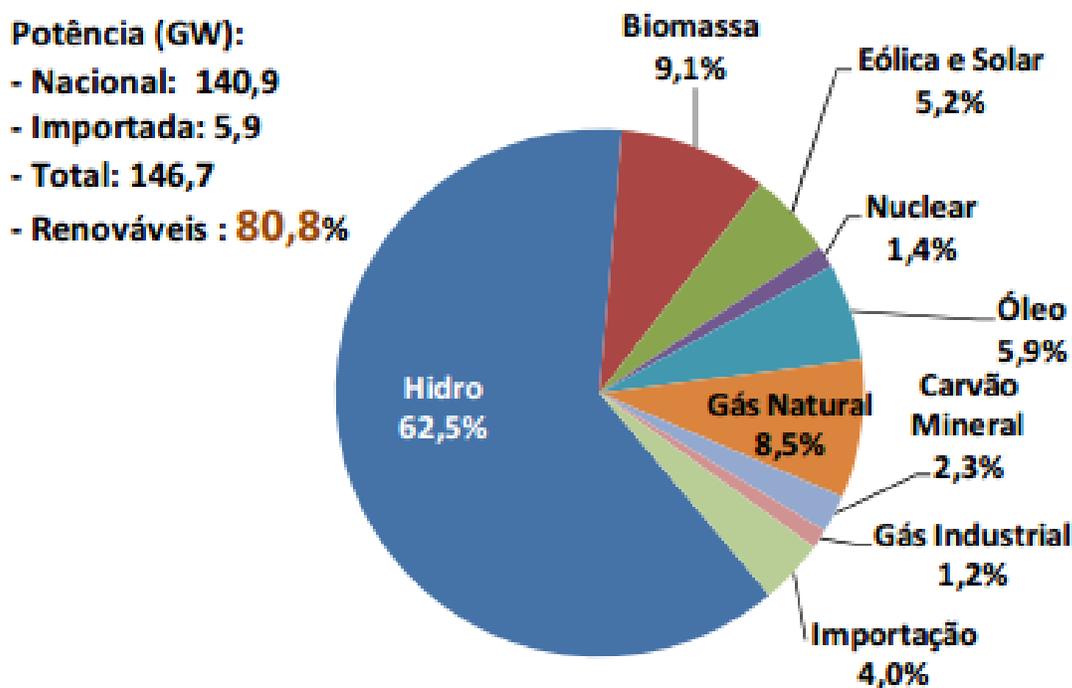


Figura 1 - Oferta de potência de energia elétrica no ano de 2015. Figura extraída de (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Alguns pontos envolvendo a segurança no fornecimento de energia do país indicam a necessidade de mudanças na matriz energética nacional, podendo-se destacar questões ambientais e a disponibilidade da água.

Primeiramente, deve-se destacar as preocupações atuais relacionadas ao aquecimento global, que é provocado pelas emissões de gases do efeito estufa, provenientes em parte da produção de energia elétrica (GOMES, 2013). Um dos principais gases do efeito estufa é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que pode ser gerado pela queima de combustíveis fósseis como petróleo, gás natural e carvão. Estes são os principais combustíveis utilizados para geração de energia elétrica através das usinas termelétricas, onde o vapor proveniente da queima desses gases é utilizado para movimentar as pás das turbinas. A Figura 2 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com cada fonte nos anos de 2014 e 2015, sendo o óleo o principal contribuinte, responsável por 66,3% das emissões no ano de 2015. Além disso o setor de energia elétrica apresentou um índice de emissão de 16,4% no mesmo ano, sendo o transporte o setor pioneiro nas emissões, com 42,8% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

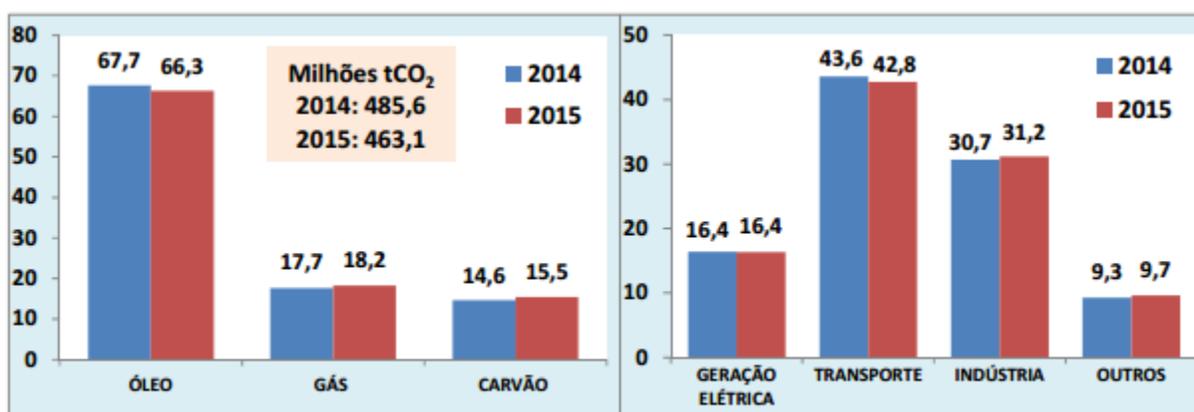


Figura 2 - Emissões de CO<sub>2</sub> por fonte e por setor brasileiro, em porcentagem, para os anos de 2014 e 2015. Figura extraída de (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Além das questões ambientais envolvidas no processo de geração de energia, também é importante destacar a escassez dos recursos hídricos que o Brasil vem enfrentando nos últimos anos. Desde 2012 a quantidade de chuvas no país tem diminuído rigorosamente, mas foi nos anos de 2014 e 2015 que o país enfrentou uma das maiores crises hídricas da história. Para fins ilustrativos vale-se destacar o Sistema Cantareira, que é um dos maiores sistemas do mundo

destinado a captação e tratamento de água, abrangendo 12 municípios do estado de São Paulo e com uma capacidade total de 1,165 trilhão de litros de água (PASCHOALOTTI; NETO; 2016). No ano de 2014, o Sistema Cantareira constava com 10,7% da sua capacidade total e em 2015 essa capacidade foi reduzida a -9,3%, conforme é mostrado na Figura 3. Isso mostra o quanto a disponibilidade da água tem se tornado instável e escassa nos últimos anos (PEGORIM, 2016).

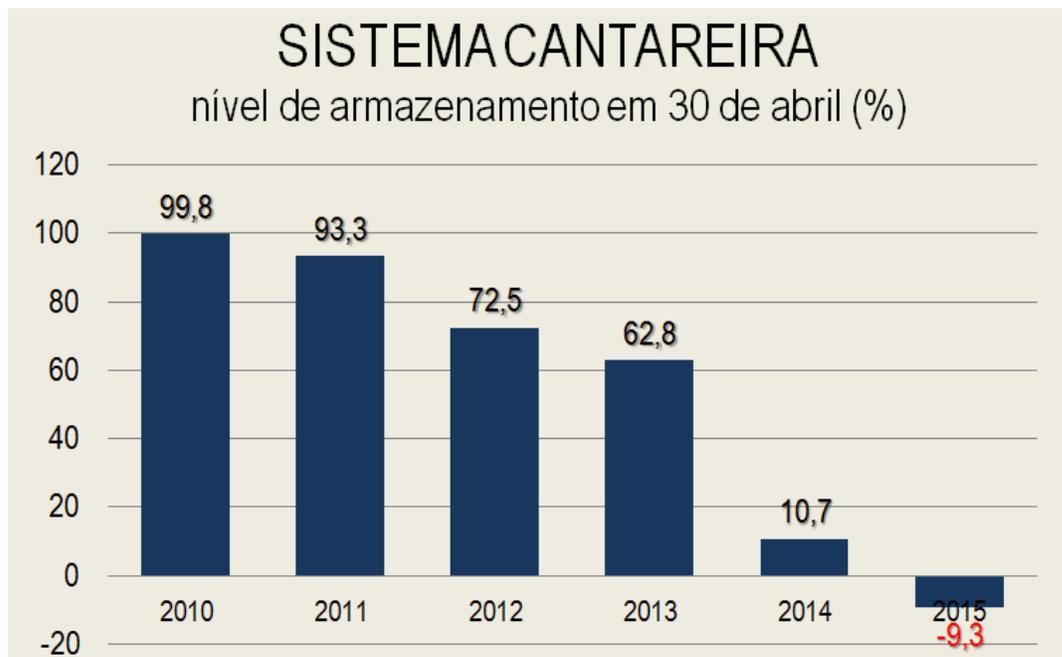


Figura 3 - Nível de armazenamento do sistema Cantareira, mostrando a evolução de 2010 a 2015. Figura extraída de (PEGORIM, 2016).

Baseado no contexto exposto, é possível concluir que há uma necessidade de mudança na matriz energética do Brasil para os próximos anos. Existem metas relacionadas a redução de 174 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> no país. Uma alternativa que tem favorecido o alcance dessa meta é a expansão do etanol na matriz energética brasileira. O etanol é considerado o principal substituto da gasolina, permitindo assim uma redução na emissão dos gases do efeito estufa (GOMES, 2013).

Segundo o relatório “Revolução Energética”, até 2050, a matriz energética brasileira pode contar com 66,5% de fontes como vento, sol e biomassa, para alimentar setores como

elétrico, industrial e de transporte. Com isso, até 2040 será possível evitar a construção de novas hidrelétricas e diminuir drasticamente a utilização das usinas nucleares, térmicas movidas a óleo combustível e a carvão mineral (GREENPEACE, 2013).

Ao que tudo indica, o Brasil já começou a tomar iniciativas para que as metas mencionadas anteriormente sejam alcançadas. Segundo dados da *Renewables 2015 Global Status Report*, enquanto países desenvolvidos mostraram um aumento de apenas 3% nos investimentos de energias renováveis, economias em desenvolvimento como Brasil, China e Índia, obtiveram um aumento de 36%, o que equivale a aproximadamente USD 131,3 bilhões. No ano de 2014, o Brasil ocupou o *ranking* dos dez maiores investidores em energias renováveis no mundo, obtendo o maior aumento percentual entre os países, juntamente com a Holanda, com USD 7,6 bilhões investidos como mostra a Figura 4 (REN21, 2015).

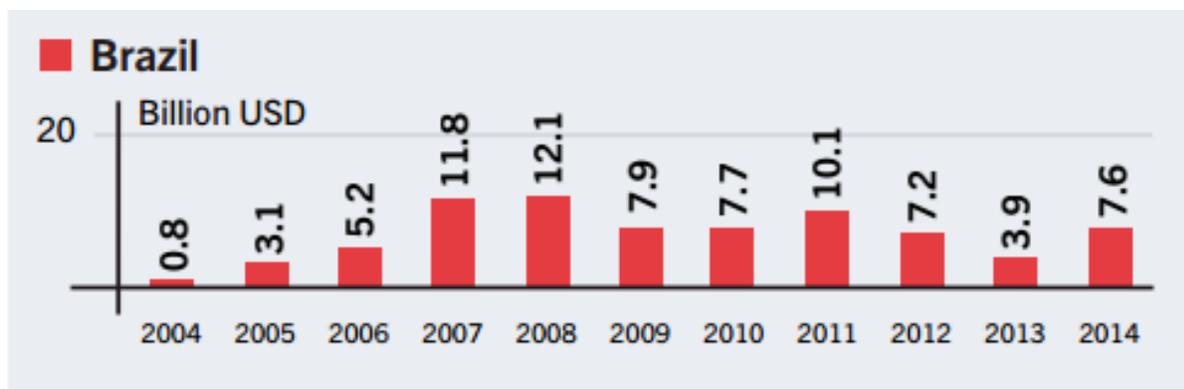


Figura 4 - Investimentos em energias renováveis no Brasil, no período de 2004 a 2014. Figura extraída de (REN21, 2015).

Considerando o investimento feito em fontes renováveis nos últimos anos, o maior deles tem sido direcionado para geração eólica. A Tabela 1 mostra a variação da capacidade instalada para diferentes fontes de geração elétrica. Como se pode observar, a energia eólica é a pioneira apresentando um aumento equivalente a 2261% no período compreendido entre os anos de 2008 e 2015. Além disso, a utilização de usinas a biomassa apresentou um crescimento de 196% (PANORAMA COMERC, 2015).

Tabela 1 - Crescimento da matriz energética brasileira entre 2008 e 2015.

<b>Fonte</b>	<b>Capacidade instalada MW (2008)</b>	<b>Capacidade instalada MW (2015)</b>	<b>Variação 2015/2008 (%)</b>
Hidroelétrica	77.091	89.811	17%
Termoelétrica	17.352	25.919	49%
Biomassa	4.193	12.415	196%
Nuclear	2.007	1.990	-1%
Eólica	247	5.833	2261%
Solar	-	15	-
<b>Total</b>	<b>100.890</b>	<b>135.983</b>	<b>35%</b>

Tabela adaptada de (PANORAMA COMERC, 2015).

### 1.1 Problema

A utilização de uma microrrede na geração de energia elétrica é considerada uma solução para alguns dos problemas que o país vem enfrentando, podendo-se destacar, aumento de demanda, falhas do sistema de distribuição e centros de consumo afastados.

Estima-se que haverá um aumento no consumo de energia elétrica no país de 4,1% ao ano, no período de 2015 a 2024 (EPE, 2015). Esse aumento de demanda previsto para os próximos anos exigirá que sejam feitos novos investimentos de modo a aumentar a oferta de energia no país. Para se ter uma ideia, mesmo que fosse aproveitado 80% do potencial hidráulico instalado no Brasil, ainda assim a demanda prevista em 2030 não seria atendida. Sendo assim, esse tipo de sistema apresenta uma alternativa para o aumento de demanda previsto para os próximos anos.

Outro problema enfrentado pela população está relacionado a confiabilidade do sistema de distribuição. Segundo dados da ANEEL, uma pesquisa de satisfação do consumidor feita entre abril de 2015 e março de 2016, apontou que 53,97% da população indicou a interrupção do fornecimento de energia elétrica como o maior problema enfrentado (CARVALHO, 2016). Através da utilização das microrredes, a energia pode ser gerada próxima ao consumidor, aumentando a eficiência do sistema, a confiabilidade no fornecimento e diminuindo as perdas devido ao processo de transmissão e distribuição.

Por fim, estima-se que 190 mil famílias brasileiras ainda vivem sem energia elétrica, sendo a maior parte residente na zona rural (CARDOSO, 2015). Sendo assim, as microrredes

possibilitam que as comunidades, que se encontram afastadas do sistema de distribuição, gerem sua própria energia elétrica.

## **1.2 Justificativa**

O Brasil enfrentou nos últimos anos a maior crise hídrica da história do país. A população foi afetada por esse problema de diversas maneiras, podendo-se destacar a queda na produção de energia elétrica devido a alta dependência das hidrelétricas.

A inserção das microrredes no cenário energético brasileiro resultaria em uma menor utilização das hidrelétricas e termelétricas, diminuindo assim preocupações relacionadas ao volume dos reservatórios devido a mudanças climáticas. Pode-se considerar também os benefícios que a utilização das microrredes trariam ao meio ambiente, diretamente afetado pela queima do combustível utilizado nas termelétricas, considerado altamente poluente. Sendo assim, as microrredes aproveitariam o potencial de fontes renováveis que o país possui, sem contribuir para uma maior degradação do meio ambiente.

Contudo, como foi apresentado, o uso das microrredes apresenta diversos benefícios e assim, torna-se importante a realização de estudos nessa área para que essa tecnologia seja cada vez mais difundida. Através do dimensionamento de um sistema como esse e realizando uma simulação criteriosa que permita a sua análise, é possível identificar as principais vantagens e desafios ocasionados pela implementação de uma microrrede.

## **1.3 Hipótese**

Considerando a utilização cada vez maior das fontes de energia renováveis, proporcionando uma forma de geração mais limpa, neste trabalho foi dimensionada uma microrrede com suas respectivas fontes e sistema de armazenamento. Além disso, foi feita uma simulação que retornou diversas informações a respeito do sistema, dentre elas a sua melhor configuração, a geração anual e o preço médio da energia. Tal projeto foi desenvolvido para uma região com alto potencial eólico e solar, possibilitando a geração de energia elétrica com menores impactos ambientais e que ofereça maior confiabilidade ao consumidor.

## 1.4 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é dimensionar e simular um modelo de microrrede contendo as fontes de energia renováveis solar e eólica, e um sistema de armazenamento de energia utilizando baterias. O projeto propõe que a microrrede opere desconectada da rede elétrica convencional (sistema *off-grid*). O dimensionamento foi realizado considerando como carga principal um condomínio residencial contendo trinta e seis casas. O *software* utilizado para simulação é chamado HOMER, sendo este específico para análise de microrredes. O projeto foi realizado para a cidade de Janaúba/MG, devido ao seu alto potencial eólico e solar.

## 1.5 Objetivos Específicos

Para o pleno desenvolvimento desse trabalho, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica para conhecer o estado da arte dos seguintes tópicos: Geração Distribuída e Microfontes;
- Elencar o condomínio e sua localidade para conhecer o potencial eólico e solar da região escolhida;
- Dimensionar o sistema contendo os geradores fotovoltaicos e as turbinas eólicas;
- Dimensionar e simular a microrrede proposta utilizando o *software* HOMER;
- Realizar o levantamento de custo estimado da microrrede proposta.

## 1.6 Organização do texto

Essa monografia é organizada em seis capítulos, sendo que o Capítulo 2 inclui tópicos importantes para a compreensão desse trabalho, como informações sobre geração distribuída, microrredes e algumas das microfontes utilizadas em microrredes. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, contendo detalhes do desenvolvimento do trabalho. Os resultados obtidos são descritos no Capítulo 4. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões. Algumas sugestões para trabalhos futuros são citadas no Capítulo 6, e por fim, as referências bibliográficas utilizadas são dispostas no capítulo 7.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são descritos conceitos importantes para melhor compreensão do trabalho desenvolvido, como características da geração distribuída, conceitos teóricos envolvendo microrredes, incluindo microfones utilizadas, dispositivos armazenadores de energia, potencial eólico e solar de Minas Gerais, dentre outros.

### 2.1 Geração Distribuída

Perdas de energia, custos ambientais, distâncias dos grandes potenciais hidrelétricos e a necessidade de geração limpa de energia, aumentam os incentivos para utilização de fontes alternativas de energia e próxima dos consumidores (CRUZ, 2013).

Diante dessas circunstâncias, surge o conceito de Geração Distribuída (GD), que é a forma de geração de energia junto ou próxima dos consumidores, que independe da potência gerada, da tecnologia utilizada e dos tipos de fontes de energia envolvidas (INEE, 2016). Para esse tipo de produção de energia, normalmente os consumidores utilizam fontes de energia renováveis, como: eólica, solar, hidráulica e biomassa.

A GD possui vantagens como: diminuição de custos com distribuição e transmissão, queda nas perdas do sistema elétrico, aproveitamento de recursos renováveis locais, confiabilidade, dentre outros.

Existem duas modalidades quando se fala em GD: a microgeração e a minigeração. O critério de diferenciação entre elas refere-se a potência instalada, sendo que para a microgeração este valor deve ser menor ou igual a 100 kW e para a minigeração, a potência instalada deve ser superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW (ANEEL, 2014).

A resolução normativa nº 482 de 2012 da ANEEL, apresenta as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e dá instruções relacionadas a esse tipo de sistema. A mais recente modificação dessa resolução normativa é a de nº 687, publicada em 2015 (ANEEL, 2015).

Na próxima subseção são descritos detalhes importantes sobre um novo conceito envolvendo a geração distribuída: as microrredes.

### 2.1.1 Microrredes

Uma microrrede envolve a interconexão de pequenos geradores e cargas em uma rede local. Esses sistemas podem ser conectados com a rede principal de distribuição de energia ou podem ser operados isoladamente. As microrredes consistem de uma variedade de componentes, incluindo geradores distribuídos (GDs), elementos armazenadores de energia e cargas (SU; WANG, 2012).

O conceito básico de microrrede não é considerado novo. Antes da Segunda Guerra Mundial, a maioria das redes de energia elétrica eram independentes, com plantas de geração localizadas perto dos consumidores. Foi somente após o século XX, que as redes de energia começaram a se alastrar, atingindo maiores distâncias (UCSD, 2016).

As microrredes podem ser úteis para suprir cargas elétricas onde há dificuldades de acesso da rede de distribuição convencional, como moradores de zonas rurais afastadas, áreas de florestas ou ilhas fluviais. Além disso, também podem ser projetadas para pequenas comunidades, como conjuntos habitacionais, comunidades acadêmicas (universidades e escolas), áreas comerciais e locais que exigem fornecimento ininterrupto de energia elétrica, podendo-se destacar os hospitais e sistemas prisionais.

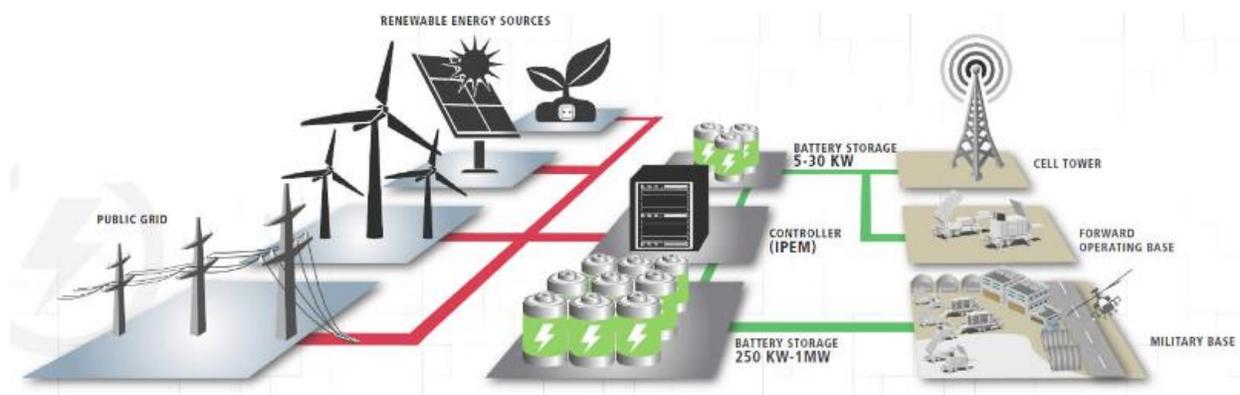


Figura 5 - Representação esquemática das partes constituintes de uma microrrede. Figura extraída de (RAYTHEON, 2015).

As microfontes que compõem uma microrrede são pequenas unidades geradoras de centenas de kW ou menos. As principais microfontes utilizadas são módulos fotovoltaicos,

geradores eólicos, microturbinas a gás, células a combustível, incluindo também as microcentrais hidrelétricas (SILVA, 2011). A Figura 5 mostra as partes que constituem uma microrrede, incluindo as microfones, sistema de armazenamento de energia utilizando baterias e sistema de controle, e as cargas.

A capacidade de uma microrrede trabalhar independentemente da rede convencional, conhecido como modo isolado, torna esse sistema ainda mais atraente. No caso de falta de fornecimento de energia, a microrrede pode ser desconectada da rede principal e funcionar como fonte primária de energia. Como exemplo, pode-se citar um episódio em que um furacão, *Hurricane Sandy*, atingiu a costa leste dos Estados Unidos em outubro de 2012 causando um prejuízo de bilhões de dólares. A tragédia causou o interrompimento de energia para 3,5 milhões de consumidores residenciais e comerciais. Mas graças ao sistema de microrrede implantado, alguns lugares continuaram com o fornecimento de energia (UCSD, 2016). Isso confirma ainda mais o quanto o projeto de microrredes se torna viável.

A fim de reforçar a viabilidade deste tipo de projeto, na próxima subseção são descritas as vantagens relacionadas à utilização das microrredes.

### 2.1.2 Vantagens relacionadas às microrredes

Existem alguns pontos favoráveis quanto aos investimentos em microrredes que devem ser mencionados. A seguir são descritas as principais vantagens relacionadas a esse tipo de geração distribuída (ALCÂNTARA, 2011), (GOMES, 2013), (MENDONÇA, 2011).

- 1. Aumento da confiabilidade:** as microrredes podem ser conectadas entre si e ao Sistema Interligado Nacional (SIN), havendo um apoio entre ambas as partes. As microrredes poderiam fornecer energia para a rede em horários de ponta, por exemplo, período em que a demanda por energia elétrica é mais elevada, diminuindo a quantidade de apagões e quedas nos horários de pico. Por outro lado, o SIN ficaria encarregado de fornecer energia para o consumidor na ausência do fornecimento proveniente da microrrede.
- 2. Facilidade e eficiência para atender o crescimento da demanda:** para os próximos dez anos o Planejamento Energético do Ministério de Minas e Energia (MME), estima

que haverá um crescimento anual de 4,1% para o consumo de eletricidade e demanda total de energia. Portanto, as microrredes possibilitam que comunidades locais, vizinhas e até mesmo prédios individuais, tenham acesso à energia elétrica em um espaço de tempo mais curto através de pequenos geradores locais. Em outros casos, deveria-se esperar por ações da companhia de energia responsável, como construção de usinas centralizadas que demoram em média cinco anos para entrarem em funcionamento.

- 3. Aproveitamento máximo de energia limpa e renovável:** normalmente as microrredes incluem sistemas de armazenamento de energia através de baterias, tornando possível o uso de fontes de energia renováveis como solar e eólica. Sendo assim, quando não houver irradiação solar e velocidade do vento suficientes para geração, o consumidor pode ser atendido pela energia armazenada nas baterias ou pelo próprio sistema de distribuição convencional. Além disso, o excedente de energia gerada pode ser vendido para outros consumidores ou até mesmo para a concessionária de energia. O uso das fontes renováveis também contribui para a redução das emissões de gases poluentes e partículas, além de resultar em maior eficiência por meio de cogeração.
  
- 4. Incentivo a importantes inovações tecnológicas:** o controle das estruturas de microrredes criam um novo modelo de negócio, contribuindo para uma maior competitividade de mercado entre empresários. Além disso, as microrredes possuem alta flexibilidade, podendo ser construídas para um único edifício ou até mesmo para pequenas comunidades, sendo necessário a oferta de serviços personalizados de energia e com melhor preço para cada consumidor. Desse modo, o mercado de energia elétrica se tornaria mais competitivo e os produtores de eletricidade começariam a se preocupar mais com o aumento da acessibilidade, eficiência e confiabilidade da energia. Pela primeira vez, o consumidor teria controle sobre o preço que paga pela eletricidade devido a concorrência existente.
  
- 5. Melhorias nas questões de operação:** a utilização das microrredes proporciona melhorias nos níveis de tensão, devido à geração local associada à maior facilidade de

compensação de reativos e à redução da sobrecarga em sistemas de distribuição e transmissão. Além disso, acarreta reduções das perdas de transmissão e distribuição de aproximadamente 3%.

- 6. Redução nos custos de energia:** as microrredes representam uma alternativa de geração mais favorável e com menor custo para os consumidores, uma vez que os custos de expansão da geração e transmissão de energia tem se tornado cada vez mais elevados. A cogeração pode ser utilizada nas microrredes, sendo que esta possui um aproveitamento energético de até 80%, enquanto o sistema de geração convencional possui uma eficiência máxima de 40%. Outra redução seria nos custos de transporte da eletricidade, uma vez que a geração local liberaria espaço nas linhas da concessionária.

Apesar de todas as vantagens descritas, a implementação de uma microrrede também apresenta pontos negativos como qualquer outro projeto. Sendo assim, na próxima subseção são apresentados os desafios e desvantagens relacionados a esse tipo de sistema.

### **2.1.3 Desafios e desvantagens relacionadas às microrredes**

Apesar dos pontos favoráveis descritos anteriormente, existem ainda alguns desafios e desvantagens relacionados à utilização das microrredes. Isso indica a necessidade do desenvolvimento de mais pesquisas nessa área a fim de aumentar a atratividade pela escolha das microrredes. A seguir são mencionados alguns pontos desfavoráveis relacionados à microrredes (SILVEIRA, 2013), (PASSOS, 2014).

- 1. Alto custo de implantação:** os altos custos das microfontes são considerados um impecílio para investimentos maiores nas microrredes. O preço de painéis solares e microgeradores eólicos, por exemplo, são considerados relativamente altos no cenário econômico atual. É necessário que haja maiores incentivos por parte do governo, pelo menos para um período determinado, nas áreas comerciais e residenciais, até que essa tecnologia se torne mais barata e difundida.

- 2. Dificuldades técnicas:** existem também dificuldades associadas à falta de experiência técnica. A integração de várias microfones em uma mesma rede torna o sistema um pouco complexo, considerando que as fontes podem ser conectadas e desconectadas a qualquer momento da rede elétrica. Este aspecto exige uma extensa pesquisa em operação de tempo real de monitoração, proteção e controle de microrredes. Além disso, existem dificuldades relacionadas aos sistemas de comunicação e controle, que necessitam da implantação de uma infraestrutura específica de telecomunicações e protocolos de comunicações.
- 3. Ausência de normas:** como as microrredes ainda são consideradas uma tecnologia nova, não existe um consenso em relação a alguns aspectos destes sistemas. Algumas questões como planejamento, operação e manutenção precisam ser definidas. Além disso, existem outros pontos que devem ser criteriosamente estabelecidos para funcionamento adequado do sistema, tais como: dados de qualidade de energia para os diferentes tipos de fontes, normas e protocolos para a integração de microfones e sua participação nos mercados de energia convencionais, além de orientações de segurança e proteção.
- 4. Monopólio de mercado:** considerando que as microrredes estão autorizadas a fornecer energia elétrica para sistemas prioritários, no caso de falhas no sistema convencional, questiona-se quem regulará o preço da energia nesse caso. Como as microrredes estarão comandando o fornecimento de energia neste tipo de situação, surge um temor de que estas passarão a comercializar energia a um preço muito elevado, explorando o monopólio de mercado. Portanto, é necessário estabelecer critérios justos para os diferentes cenários.

Com a apresentação dos prós e contras na utilização das microrredes, torna-se importante mencionar a evolução deste tipo de sistema no mercado mundial. Alguns projetos de microrredes implantados em diferentes países são apresentados na próxima subseção.

#### 2.1.4 Microrredes no mundo

Apesar das microrredes serem consideradas uma tecnologia nova, já existem diversas cidades no mundo em que a geração de energia elétrica utilizando microrredes já se tornou uma realidade. A seguir, são mencionados alguns projetos de microrredes em funcionamento em outros países (MICROGRIDS AT BERKELEY LAB, 2016).

➤ **Universidade da Califórnia – San Diego (UCSD) (UC San Diego, 2016)**

O projeto de microrredes instalado na Universidade da Califórnia – San Diego (UCSD), fornece energia elétrica, aquecimento e refrigeração para o campus que possui população de aproximadamente 45.000 pessoas.

Atualmente, as microfuentes utilizadas são células a combustível, painéis solares e central de cogeração, juntas totalizando uma capacidade de geração de aproximadamente 35,1 MW.

O projeto de microrredes no campus de São Diego é considerado um dos mais avançados no mundo, sendo responsável por 92% da geração de energia usada no *campus* anualmente, economizando mais de USD 8 milhões, quando comparado com energia importada.

Quanto ao sistema de armazenamento, a universidade está utilizando e testando vários tipos de baterias e outros métodos alternativos, e já recebeu um capital de incentivo de USD 3 milhões proveniente do SGIP (*Self-Generation Incentive Program*).

➤ **Projeto de Microrrede Sendai, Japão**

O projeto de microrrede Sendai é talvez uma das mais bem conhecidas demonstrações de microrredes no planeta. O projeto foi executado entre os anos de 2005 e 2008, tendo como principal objetivo a realização de testes pela *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO). A microrrede era responsável pelo fornecimento de energia para as instalações da Universidade Tohoku Fukushi. Depois de algumas atualizações o projeto ainda continua em operação sobre o gerenciamento do *NTT Facilities, Inc.* (NTT-F).

Em março de 2011, o projeto ganhou destaque quando um terremoto e *tsunami* atingiu o distrito de Tohoku, causando grandes prejuízos no sistema de fornecimento de energia do distrito. Após algumas horas sem funcionamento, os geradores foram ligados e a microrrede forneceu energia e calor para o hospital da Universidade Tohoku Fukushi durante os dois dias de *blackout*.

O sistema contém dois geradores movidos a gás natural com potência de 350 kW, 50 kW proveniente de painéis solares e sistema de armazenamento de energia utilizando baterias.

#### ➤ **Projeto de Microrrede Huatacondo, Chile**

A Universidade do Chile desenvolveu o primeiro projeto de microrrede em uma comunidade na Cordilheira dos Andes com aproximadamente 150 residentes (maior parte formada por mineradores e suas famílias), chamada Huatacondo.

A comunidade já possui sua própria geração utilizando geradores a diesel funcionando 10 horas por dia. O objetivo principal era continuar usando os geradores a diesel e para complementar a geração, seriam utilizadas fontes renováveis como solar, eólica e um sistema de armazenamento com baterias.

O sistema tem capacidade de geração de 175 kW e já apresenta resultados satisfatórios. O consumo de óleo diesel diminuiu 50% e o sistema fotovoltaico atingiu um fator de capacidade de 28%.

#### ➤ **Ilha de Eigg, Escócia**

A Ilha de Eigg, localizada na Escócia, possui uma área de 31 km<sup>2</sup> e possui um projeto utilizando microrrede com alto potencial, fundado em 2008 pela *European Regional Development Fund*. Os 90 moradores da Ilha de Eigg eram totalmente dependentes de seus geradores a diesel e sistemas mini-hidráulicos para geração própria de energia elétrica.

O projeto de microrrede integrando fontes de energias renováveis foi bem sucedido e contribuiu para diminuir a utilização de geradores a diesel na ilha. A energia proveniente das pequenas hidrelétricas é de aproximadamente 110 kW, 24 kW são obtidos pela utilização de

turbinas eólicas e 32 kW são fornecidos pelo sistema fotovoltaico, totalizando uma geração de 166 kW.

Desde que a microrrede foi implantada em 2008, a energia elétrica na ilha é disponibilizada 24 horas por dia com custos reduzidos e 95% dessa energia é proveniente de fontes renováveis.

#### ➤ **Projeto de Microrrede em Mannheim-Wallstadt, Alemanha**

Este projeto foi executado em Mannheim-Wallstadt, um estado ecológico, em 2006. O objetivo principal era construir uma microrrede possibilitando uma desconexão suave do sistema principal de fornecimento de energia, funcionando como modo isolado.

O projeto foi direcionado a consumidores residenciais e comerciais, onde a potência total da carga varia entre 80 kW até 230 kW. As microfontes utilizadas são células a combustível, painéis fotovoltaicos e cogeração, totalizando 53 kW gerados.

Com exemplos de sistemas internacionais já implementados apresentados, é possível verificar a dimensão que as microrredes vêm ocupando no mercado mundial. Com isso, na próxima subseção, são descritos alguns projetos a nível nacional.

### **2.1.5 Microrredes no Brasil**

No Brasil cerca de 190 mil famílias brasileiras ainda vivem sem energia sendo que a maior parte delas estão localizadas na zona rural. Há 12 anos, o governo tenta universalizar o acesso à energia elétrica por meio do programa Luz para Todos, entretanto boa parte da população ainda continua sem energia elétrica (DINIZ, 2015).

Além das 190 mil residências citadas, existem comunidades isoladas na Amazônia que não foram contabilizadas, mas também não possuem acesso a energia elétrica. Essa é uma das dificuldades encontradas pelo programa Luz para Todos, pois são comunidades isoladas e de difícil acesso.

Uma alternativa para atender essas comunidades seria a implementação de microrredes utilizando fontes de energia renováveis, a fim de garantir uma geração de energia constante

para a população. A seguir, são descritos alguns projetos de microrrede em funcionamento no Brasil.

➤ **Ilha dos Lençóis, Maranhão (RIBEIRO *et al.*, 2011)**

A Ilha dos Lençóis está localizada no município de Carurupu no Maranhão. O projeto foi desenvolvido com o objetivo de fornecer energia elétrica à comunidade a partir das fontes renováveis solar e eólica. Antes da implantação do sistema, o fornecimento de energia era proveniente de um gerador a diesel que funcionava quatro horas por dia.

O projeto de microrrede é composto por três turbinas eólicas de 7,5 kW e 162 painéis fotovoltaicos com uma capacidade total de 21 kWp (quilo watt-pico). O sistema de armazenamento utiliza-se de 120 baterias de 150 Ah, energia que posteriormente é transformada por meio de dois inversores de 20 kVA cada.

Portanto, a potência total instalada é de 40 kVA e a arquitetura é definida com um barramento em corrente contínua a 240 V, sendo que a tensão de suprimento é de 380/220 V a 60 Hz. A autonomia do sistema projetado é de aproximadamente 12 horas.

➤ **Projeto Xapuri, Acre (CARVALHO, 2013)**

O município de Xapuri está localizado no interior do Acre. O Projeto Piloto de Xapuri foi criado a título de experiência e contemplou três seringais da reserva extrativista Chico Mendes: Iracema, Dois Irmãos e Albrácea, sendo que cada um deles obteve um tipo diferente de Sistema Fotovoltaico Domiciliar (SFD).

Foram instalados para cada sistema: três módulos fotovoltaicos com potência de 85 Wp, duas baterias estacionárias de 150 Ah/12Vcc, um controlador de carga de 30 A e um inversor de frequência de 300 W.

A instalação do sistema resultou em benefícios para as famílias como custo de aquisição e manutenção menor, além de risco mínimo de acidentes e choques elétricos.

➤ **Usina Distrital, Santa Catarina (ANPROTEC, 2016) (INFRAROI, 2016)**

Inaugurada em fevereiro de 2016, a Usina Distrital está localizada na cidade de Florianópolis. Com foco no desenvolvimento sustentável, a usina será conectada à rede da Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc) e produzirá energia renovável para consumo local em caso de falhas no fornecimento.

A usina opera com 8 kW de geração renovável, combinando energia eólica e solar. Um banco de baterias com capacidade de armazenamento de 10 kW é utilizado para complementação das fontes, além do gerador movido à óleo diesel de 5,5 kW, que só é acionado em casos de emergência e quando as baterias estão vazias.

No modo conectado com a rede de distribuição, a usina fornece energia para as cargas locais e o excedente ainda pode ser enviado para a rede.

➤ **Projeto para condomínio residencial, Ceará (ENEL, 2015)**

O projeto Microrrede Inteligente vai beneficiar dez casas de alto consumo, cerca de 780kWh/mês, do loteamento *AlphaVille* em Fortaleza, além de áreas de lazer, portaria e vias internas do empreendimento residencial. O objetivo é transformar a estrutura elétrica interna do condomínio numa microrrede autônoma, capaz de funcionar conectada ou não à rede elétrica.

A microrrede utiliza fontes de energia renováveis para a geração e um sistema de armazenamento de energia utilizando baterias. Os consumidores serão capazes de monitorar em tempo real a energia gerada pelos painéis solares e a quantidade consumida. Caso a quantia gerada não seja totalmente consumida, o excedente poderá ser utilizado para recarregar as baterias e também poderá ser enviado para as redes.

A primeira fase do projeto é a instalação de painéis fotovoltaicos nas residências e áreas comuns do loteamento. Além da geração solar, o sistema contará também com geração eólica de 7 kW, armazenamento de energia de 111 kWh. A previsão é que o projeto esteja concluído até o final de 2016.

Um dos pontos mais importantes a serem analisados durante a fase de projeto de uma microrrede está relacionado com as microfuentes a serem utilizadas. Na próxima subseção é realizada uma breve introdução sobre microfuentes associadas a microrredes.

## **2.2 Microfontes**

Um dos objetivos principais das microrredes é de combinar fontes de energia não convencionais ou renováveis de baixa emissão de carbono em sistemas de geração de alta eficiência (PASSOS, 2014).

A escolha sobre qual microfente utilizar depende da disponibilidade do recurso na área de implementação da microrrede. As principais microfentes utilizadas para geração distribuída são: sistemas de energia e calor combinados (CHP), microturbinas, células de combustível, geradores eólicos, geradores fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Nas próximas subseções são abordadas apenas as microfentes eólica e solar, pois são as únicas utilizadas na realização do trabalho.

### **2.2.1 Energia Eólica**

A energia eólica é basicamente definida como aquela obtida da energia cinética (do movimento) gerada pela migração das massas de ar provocada pelas diferenças de temperatura existentes na superfície do planeta (ANEEL, 2008).

A geração eólica ocorre pelo contato dos ventos com as pás do aerogerador, principal elemento que integra a usina. O movimento das pás dá origem à energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, produzindo eletricidade. A quantidade de energia mecânica transferida, conseqüentemente o potencial de energia elétrica a ser produzida, está diretamente relacionada à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade do vento (ANEEL, 2008).

Os parques eólicos podem ser localizados em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). Cada local apresenta características e comportamentos diferentes, portanto turbinas diferenciadas podem aproveitar o máximo do potencial energético de cada sítio (GREENPEACE, 2013). No Brasil, os parques *onshore* são montados com turbinas de 3 MW sobre torres de 100 m de altura ou mais.

O aerogerador ou turbina é acoplado ao gerador por uma caixa de engrenagens. Geralmente, os geradores de indução são mais utilizados e as principais partes do conjunto são a torre, o rotor e a nacela. A nacela abriga os mecanismos de transmissão, o gerador e o rotor, e possui três pás nos modelos mais comuns (PASSOS, 2014). A Figura 6 mostra as partes que constituem uma turbina eólica convencional (de eixo horizontal).

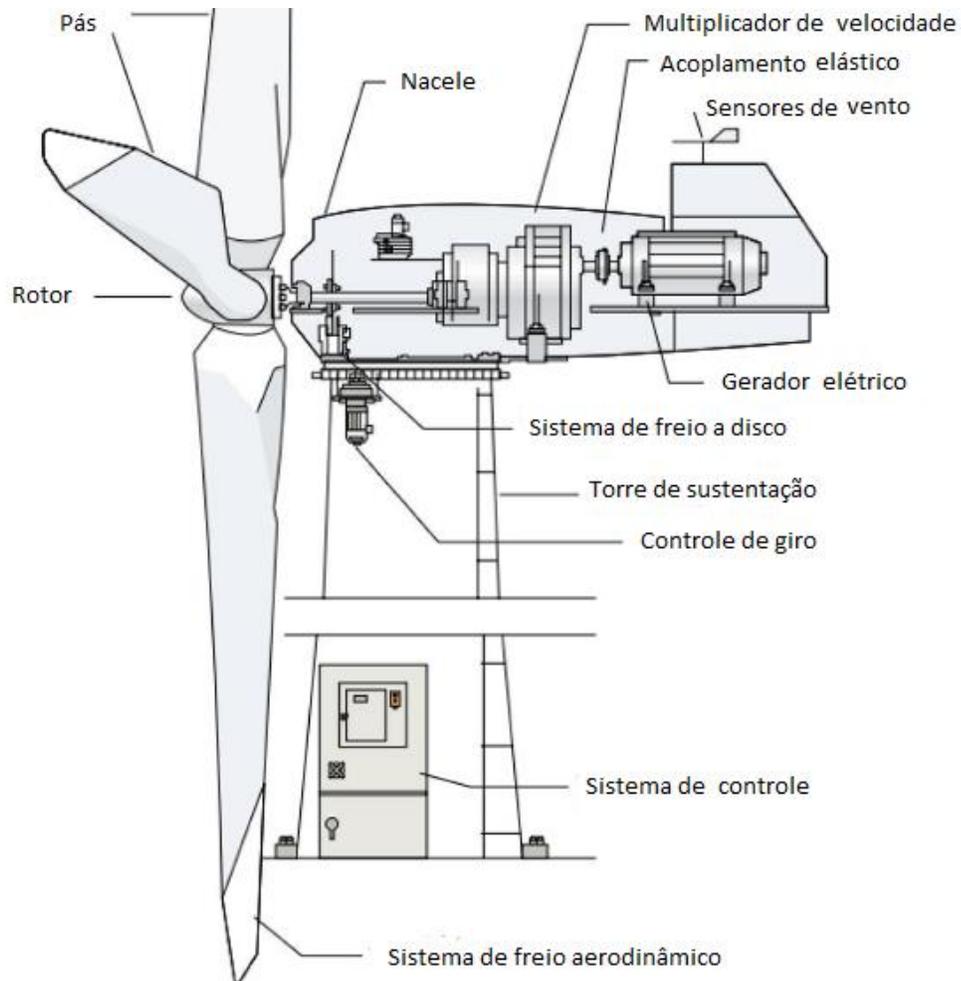


Figura 6 - Desenho esquemático de uma turbina eólica de eixo horizontal. Figura adaptada de (CBEE, 2002).

Considerando a importância da turbina eólica para o sistema, na próxima subseção são apresentados os principais tipos de turbinas eólicas.

### 2.2.1.1 Tipos de turbinas eólicas

Uma maneira prática para classificar turbinas eólicas está relacionada ao eixo que as pás da turbina giram em torno. A maioria são turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT), mas existem algumas em que as pás giram em torno de um eixo vertical (VAWT). Exemplos dos dois tipos de turbinas podem ser visualizados na Figura 7.

Uma das vantagens da turbina horizontal é que os componentes contidos na nacelle (o invólucro ao redor do gerador, caixa de engrenagens e outros componentes mecânicos) podem ser instalados no chão. Em contrapartida, existem várias desvantagens relacionadas a esse tipo de turbina, sendo que a principal é que as pás estão próximas ao chão onde a velocidade do vento é mais baixa.

A maioria das turbinas eólicas utilizadas são de eixo horizontal, por serem mais simples e apresentarem melhores resultados para grandes potências. Estas são divididas em duas categorias: as turbinas frontais (*upwind*) e de retaguarda (*downwind*). A principal diferença entre elas diz respeito ao posicionamento das pás de acordo com o vento. Nas turbinas frontais o vento sopra pela parte frontal e nas turbinas de retaguarda, como o próprio nome diz, o vento sopra pela retaguarda das pás (Figura 7).

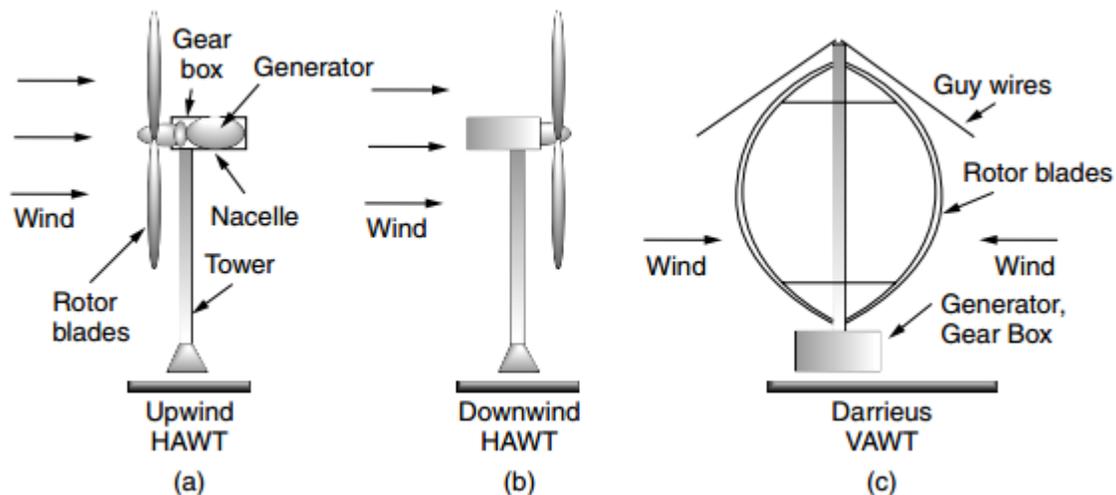


Figura 7 - Principais tipos de turbinas eólicas: (a) *Upwind* HAWT; (b) *Downwind* HAWT; (c) Darrieus VAWT. Figura extraída de (MASTERS, 2004).

Outra decisão importante com relação a turbinas eólicas é referente ao número de pás. Turbinas eólicas com muitas pás operam com velocidade rotacional muito menor do que aquelas com poucas pás. A medida que as rotações por minuto (rpm) aumentam, a turbulência causada por uma pá afeta a eficiência da próxima pá. Utilizando uma turbina com menos pás, esta pode girar mais rápido antes que a interferência se torne excessiva (MASTERS, 2004).

Nos últimos anos, o tamanho médio das turbinas eólicas cresceu significativamente, como pode ser visto na Figura 8. Em termos de eficiência as turbinas mais modernas tem apresentado fatores de capacidade superiores a 50%, enquanto nos anos 1980 o número máximo era de aproximadamente 40% (IPCC, 2012).

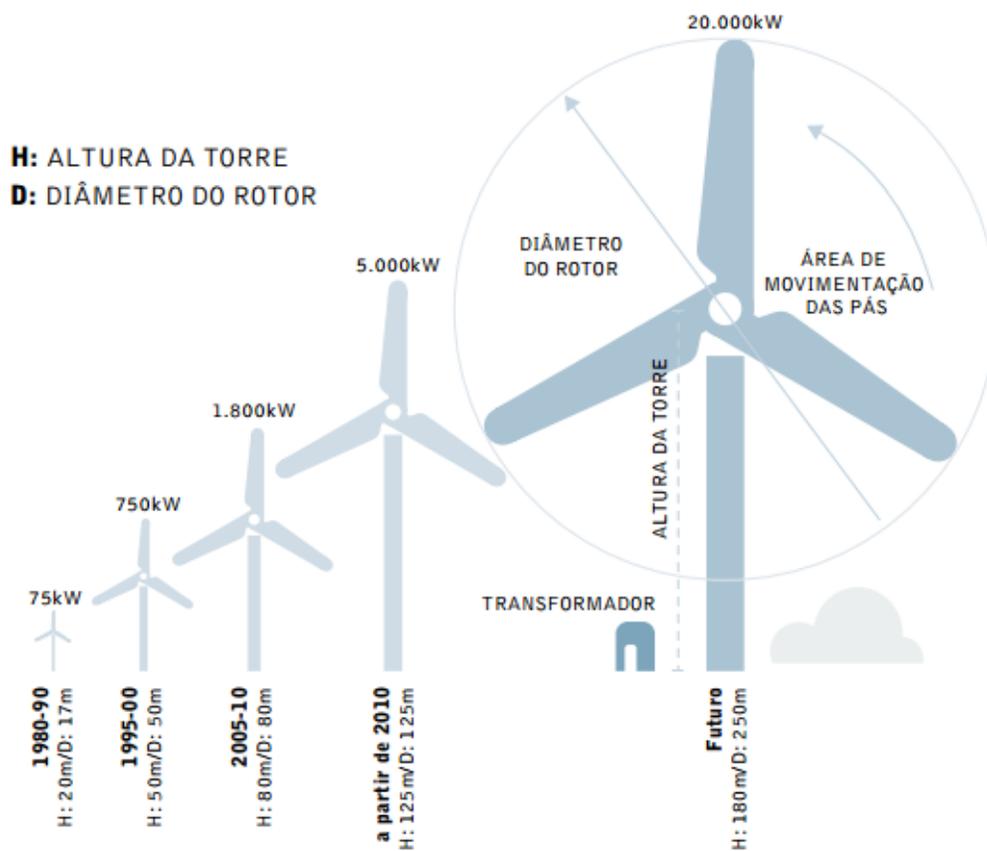


Figura 8 - Crescimento do tamanho de uma turbina eólica comercial típica. Figura extraída (IPCC, 2012).

Assim, na próxima subseção são apresentados conceitos referentes à potência do vento em turbinas eólicas.

### 2.2.1.2 Potência do vento

Algumas áreas são favorecidas pela velocidade anual do vento superior ao intervalo de 4 a 5 m/s, o que torna favorável a implementação de pequenos sistemas de geração eólica. É importante realizar uma análise criteriosa a fim de obter informações precisas sobre a velocidade do vento no local, antes de tomar qualquer decisão, para que o projeto alcance os resultados esperados.

A potência proveniente do vento é proporcional aos seguintes fatores (WWEA, 2006):

- Área da turbina sendo atingida pelo vento;
- O cubo da velocidade do vento;
- A densidade do vento, que varia com a altitude;

A equação utilizada para calcular a potência proveniente do vento é mostrada a seguir:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

onde,  $P_w$  é a potência do vento (W),  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ) (a  $15^\circ\text{C}$  e 1 atm,  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  é a área transversal atingida pelo vento ( $\text{m}^2$ ) e  $v$  é a velocidade do vento normal a  $A$  (m/s).

De posse da Eq.(1) pode-se verificar que, o fato da potência ser diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento, esse é muito significativo no âmbito de projeto de turbinas. Tal afirmação pode ser demonstrada considerando, por exemplo, que a velocidade do vento dobre. Nessa condição a potência aumentaria por um fator de oito. Portanto, é de grande importância encontrar a melhor localização para alocar a turbina eólica, ou seja, aquela que possui maior velocidade média do vento.

Com isso, na próxima subseção é apresentado o potencial e a produção eólica no território brasileiro.

### 2.2.1.3 Potencial e produção eólica no Brasil

O Brasil é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e pela volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que dá maior previsibilidade ao volume produzido. Além disso como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar usinas eólicas complementando a produção das hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas (ANEEL, 2008).

Em 2007, um estudo realizado pela *World Wind Energy Association* (WWEA) mostrou que o Brasil ocupava o 25º lugar na produção de energia eólica no mundo, com 247 MW de potência instalada (ANEEL, 2008). O mesmo estudo realizado para o ano de 2015 mostra que o Brasil é considerado o 10º maior produtor de energia eólica no mundo todo, apresentando uma capacidade total instalada de 6.800 MW, conforme pode ser visto na Figura 9. O país pioneiro na produção de energia eólica é a China com 124.710 MW de potência.

Position	Country/Region	Total capacity June 2015 [MW]	Added capacity H1 2015 [MW]	Total capacity end 2014 [MW]	Added capacity H1 2014 [MW]	Total capacity end 2013 [MW]	Total capacity June 2013 [MW]
1	China	124'710	10'101	114'763	7'175	91'413	80'827
2	United States	67'870	1'994	65'754	835	61'108	59'884
3	Germany	42'367	1'991	40'468	1'830	34'658	32'458
4	India *	23'762	1'297	22'465	1'112	20'150	19'564
5	Spain	22'987	0	22'987	0	22'959	22'918
6	United Kingdom	13'313	872	12'440	649	10'531	9'776
7	Canada	10'204	510	9'694	723	7'698	6'578
8	France	9'819	523	9'296	338	8'254	7'697
9	Italy	8'787	124	8'663	30	8'551	8'417
10	Brazil	6'800	838	5'962	1'301	3'399	2'788
11	Sweden	5'582	157	5'425	354	4'470	4'271
12	Denmark	4'959	76	4'883	83	4'772	4'578
13	Portugal *	4'953	0	4'953	105	4'724	4'547
14	Turkey	4'193	431	3'763	466	2'958	2'619
15	Poland	4'117	283	3'834	337	3'390	2'798
16	Australia	4'006	200	3'806	699	3'049	3'059
	Rest of the World	34'600	2'400	32'219	1576	26'493	23'802
	<b>Total</b>	<b>392'927</b>	<b>21'678</b>	<b>371'374</b>	<b>17'613</b>	<b>318'577</b>	<b>296'581</b>

Figura 9 - Países/regiões com mais de 4 GW de capacidade total instalada até Junho/2015.  
Figura extraída de (WWEA, 2015).

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem cerca de 361 empreendimentos em operação no país resultando em uma potência fiscalizada de 8.795.690 kW, o que representa 6,15% da geração de energia elétrica total do país. Além disso, existem 141 empreendimentos em construção e 250 projetos que ainda não foram iniciados (ANEEL, 2016).

Após a apresentação de conceitos relativos a energia eólica, na próxima subseção são apresentados conceitos referentes a uma outra fonte de energia, a energia solar.

## **2.2.2 Energia Solar**

Atualmente a energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada principalmente em pequenos sistemas isolados ou autônomos instalados em locais não atendidos pela rede elétrica, em regiões de difícil acesso ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não é economicamente viável. Além das razões técnicas descritas, levando em consideração questões ambientais e econômicas, a geração de energia elétrica contendo sistemas solares tem sido altamente utilizada nos últimos anos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Dependendo da região analisada, a média do índice de radiação solar é maior que 5 kWh/m<sup>2</sup> por dia, o que possibilita a sua utilização para o bombeamento de água em poços artesanais, para produção de energia elétrica e para o aquecimento da água.

Através da radiação solar emitida em determinados materiais, em particular, nos materiais semicondutores, ocorre a transformação dos efeitos dessa radiação em energia elétrica. Essa fonte de energia é uma das mais viáveis comparada as demais fontes para o contexto brasileiro, devido aos altos índices de radiação solar detectados no país. (BOSO; GABRIEL; FILHO, 2015).

Posteriormente, são apresentados os componentes necessários para a implementação de um sistema fotovoltaico.

### **2.2.2.1 Componentes de um sistema fotovoltaico**

Um sistema fotovoltaico é composto por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e em alguns casos, um bloco de armazenamento. O bloco gerador

possui basicamente os arranjos fotovoltaicos em diferentes associações. O bloco de condicionamento de potência pode ter conversores, inversores, controladores de carga, dentre outros. Finalmente, o bloco de armazenamento inclui as baterias. A seguir são descritas as características principais de alguns desses elementos (CEPEL; CRESESB, 2014).

- **Módulos fotovoltaicos:** é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo que promove a proteção das células. As células podem ser fabricadas com diferentes materiais, mas os tipos mais comuns disponíveis comercialmente são constituídas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo. Um módulo pode possuir um número variado de células, geralmente são formados por 33 a 36 ligadas em série ou paralelo, mas esse número depende do valor esperado de corrente e tensão. Além disso, os módulos também podem ser ligados em série ou paralelo a fim de se obter potências maiores, dando origem aos painéis fotovoltaicos, também conhecidos como arranjos fotovoltaicos. Uma fileira contendo módulos conectados em série é chamada de *string*, como mostrado na Figura 10.

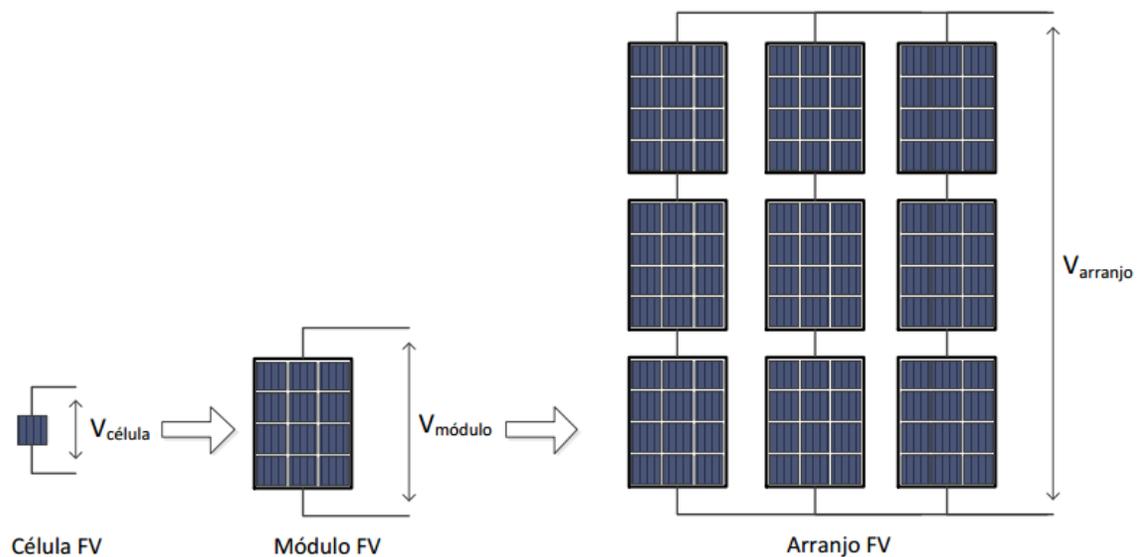


Figura 10 - Representação esquemática de: célula, módulo e arranjo fotovoltaico. Figura extraída de (ALMEIDA, 2012).

- **Baterias:** em sistemas isolados da rede elétrica, o uso de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. Assim, a energia gerada durante o dia pode ser armazenada e utilizada posteriormente para atender à demanda. Nos sistemas fotovoltaicos, as baterias de ácido de chumbo são as mais utilizadas para os armazenamentos de curta duração. Estas possuem a melhor relação entre preço e eficiência e podem assegurar elevadas e reduzidas correntes de carga com uma boa eficiência.
- **Controladores de Carga:** são incluídos na maioria dos sistemas fotovoltaicos com o objetivo de proteger a bateria (ou banco de baterias) contra cargas e descargas excessivas, aumentando a sua vida útil. É considerado um elemento crítico em sistemas fotovoltaicos isolados, pois caso venha a falhar, a bateria poderá sofrer danos irreversíveis. Os controladores devem desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria atingir carga plena e interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria atingir um nível mínimo de segurança. A Figura 11 mostra os elementos constituintes de um sistema fotovoltaico domiciliar, incluindo o controlador de carga.

- A: Painel fotovoltaico
- B: Controlador de carga
- C: Banco de baterias
- D: Inversores
- E: Cargas
- F: Caixa de conexão

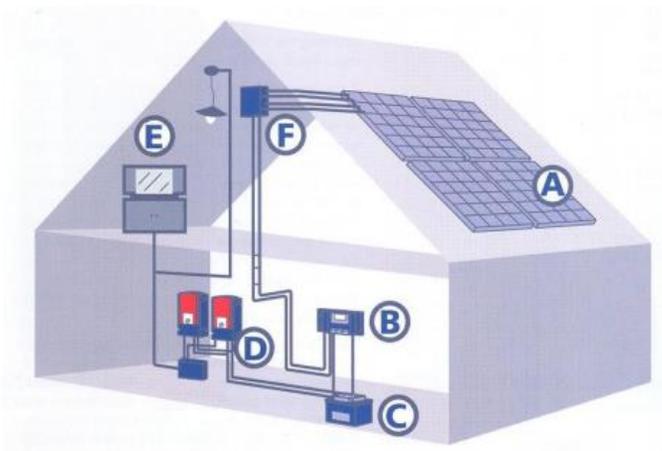


Figura 11 - Esquema de um sistema fotovoltaico domiciliar. Figura extraída de (CEPEL; CRESESB, 2014).

- **Inversores:** no sistema fotovoltaico a energia proveniente dos dispositivos armazenadores de energia (baterias, células a combustível) e dos módulos fotovoltaicos

é feito sob a forma de um sinal contínuo. Portanto, os inversores são utilizados para fornecer energia elétrica em corrente alternada (c.a) a partir da fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c). Os inversores são dispositivos importantes em sistemas fotovoltaicos uma vez que a maioria das cargas utilizadas, domiciliares e comerciais, são alimentadas em corrente alternada.

Como forma de verificar a importância de alguns fatores na geração de energia fotovoltaica, na próxima subseção, é apresentada a influência da irradiância solar e da temperatura no painel fotovoltaico.

### 2.2.2.2 Influência da irradiância solar e da temperatura

Os principais fatores que influenciam as características elétricas de um painel fotovoltaico são a intensidade da irradiância solar e a temperatura do painel.

A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente. Com uma irradiância solar de  $1.000 \text{ W/m}^2$  o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em seu catálogo (na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ) (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 12 mostra como a irradiância solar afeta a curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício.

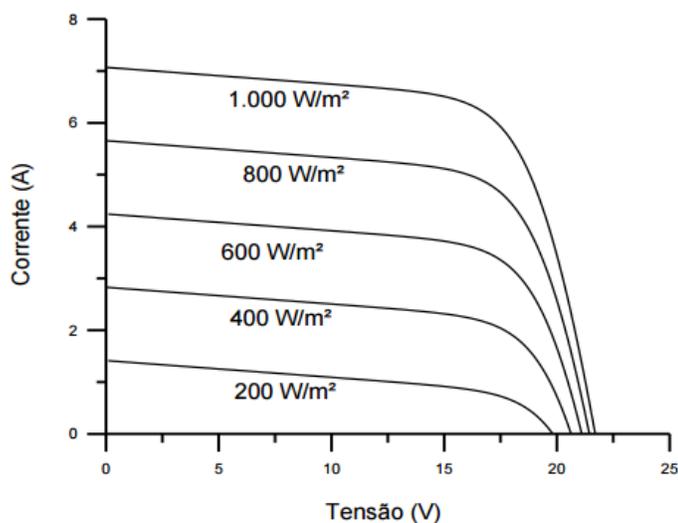


Figura 12 - Influência da radiação solar na corrente elétrica de um célula fotovoltaica a  $25^\circ\text{C}$ .  
Figura extraída de (CEPEL; CRESESB, 2014).

Por outro lado, o aumento da irradiância incidente e/ou temperatura ambiente produz um aumento na temperatura da célula, e conseqüentemente, tende a reduzir sua eficiência. Isso ocorre pois, a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível, conforme ilustrado na Figura 13. Sendo assim, a potência fornecida pelo módulo tende a diminuir, pois a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo.

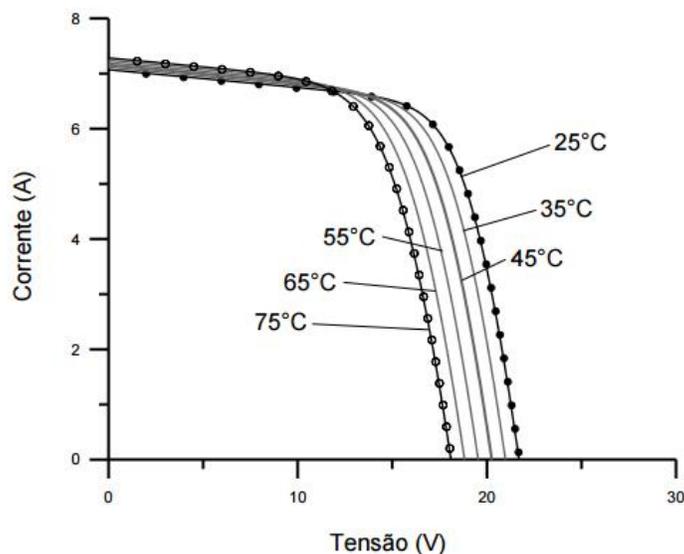


Figura 13 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (irradiância de 1.000 W/m<sup>2</sup>). Figura extraída de (CEPEL; CRESESB, 2014).

Uma característica importante das microrredes é que estas possuem instabilidade na oferta de energia elétrica, uma vez que a geração é dependente da disponibilidade das fontes de energia renováveis. Portanto, um sistema de armazenamento de energia torna-se extremamente importante. Na próxima subseção são apresentados os principais dispositivos armazenadores de energia.

### 2.2.3 Dispositivos armazenadores de energia

Uma das principais características de um sistema elétrico está relacionada à capacidade de geração de energia elétrica suficiente para atender a demanda, a preços razoáveis, levando

em consideração questões ambientais e com alta confiabilidade. Portanto, o armazenamento de energia elétrica nas microrredes é de extrema importância, devido à característica intermitente das fontes de energia renováveis utilizadas. A utilização de um sistema de armazenamento possibilita que a energia seja utilizada posteriormente, aumentando assim a eficiência do sistema (OUDALOV *et al.*, 2006). Atualmente, os dispositivos armazenadores de energia mais utilizados são baterias, os discos de inércia (*flywheels*) e os super capacitores.

Entre todas as tecnologias disponíveis para utilização em microrredes, os bancos de baterias são os mais utilizados para armazenamento de energia e utilizam eletroquímica para essa finalidade. Entre os tipos de baterias disponíveis no mercado, destacam-se: chumbo-ácido, níquel cádmio, níquel-hidreto e íon-lítio. Com relação às desvantagens relacionadas a esse tipo de sistema, pode-se citar seu alto custo e a necessidade de um espaço disponível para alocação das baterias, que são muito espaçosas.

Uma outra alternativa seria a utilização de *flywheels*, que são dispositivos giratórios com alto momento de inércia que armazenam energia rotacional, podendo ser transformada em elétrica com uma eficiência de até 90%. Uma desvantagem relacionada à utilização dos *flywheels* é que tensão e frequência de saída possuem grandes variações de amplitude (LOPES; MARCELINO, 2013).

Por fim, os super capacitores são capazes de filtrar distúrbios e transitórios na rede e devolver a energia armazenada através de barras DC. Esses dispositivos podem contribuir para o aumento da qualidade do sistema, por serem convertidos diretamente da fonte, sem harmônicos, através de barras DC (CHOWDHURY; ROSSLEY, 2009).

Os dispositivos armazenadores de energia possibilitam a implementação de sistemas *off-grid*, ou seja, aqueles que operam desconectados da rede elétrica. Mas também existe a possibilidade de uma microrrede operar paralelamente a rede elétrica, esses são os sistemas *on-grid*. Esses dois tipos de configuração são descritos na próxima subseção.

#### **2.2.4 Sistemas *on-grid* e *off-grid***

Um sistema *on-grid* é aquele que possui conexão direta com a rede elétrica convencional. Esse tipo de configuração permite que a carga seja atendida pela geração das fontes renováveis quando esse sistema possui condições favoráveis de funcionamento, por

exemplo, irradiância necessária e valores adequados de velocidade do vento. Quando é detectado um excesso na produção de energia, este excedente pode ser enviado à rede e o consumidor é recompensado por isso. Além disso, quando as fontes renováveis de energia não estão disponíveis, a rede elétrica fornecerá energia suficiente para atender à demanda. Esse tipo de sistema possui como principal vantagem a redução de custos com sistemas de armazenamento, como baterias, que possuem um custo elevado e necessitam de um espaço físico para sua instalação (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

Os sistemas *off-grid*, também conhecidos como sistemas isolados, operam independentes da rede elétrica. Para assegurar que haja fornecimento contínuo ao consumidor, sistemas *off-grid* necessitam de baterias para fornecer energia em períodos nos quais a geração por meio das fontes renováveis não é suficiente para atender a carga. Os bancos de baterias normalmente precisam ser substituídos após 10 anos de uso, além de possuírem alto custo e reduzirem a eficiência total do sistema. Normalmente, esse tipo de sistema é utilizado em áreas que não podem ser atendidas por uma rede elétrica. Caso contrário, a independência é a principal razão pela qual o consumidor opta por um sistema *off-grid* (SINGH *et al.*, 2016).

Antes da implementação de um projeto de microrredes é importante identificar a disponibilidade das fontes renováveis da área em questão. Como a ideia principal deste trabalho é dimensionar uma microrrede, contendo as fontes solar e eólica, a ser implementada no estado de Minas Gerais, na próxima seção é feito um levantamento sobre o potencial solar e eólico do estado.

### **2.2.5 Potencial solar e eólico de Minas Gerais**

Antes de iniciar qualquer projeto de geração de energia elétrica envolvendo fontes de energia renováveis, é de extrema importância analisar o potencial da região. Como o projeto de microrredes em questão será implementado para uma determinada região de Minas Gerais e utilizará as microfuentes eólica e solar, é necessário verificar as áreas mais promissoras para geração desse tipo de energia.

Os locais favoráveis para implementação de sistemas fotovoltaicos planos devem possuir radiação solar maior do que 2.000 kWh/m<sup>2</sup>, ou seja, 5,5 kWh/m<sup>2</sup> por dia (valor médio diário

anual). Com bases nesses valores, considera-se que o estado de Minas Gerais dispõe de vastas regiões que preenchem esses requisitos (CEMIG, 2012).

Como mostra a Figura 14, metade do estado, mais precisamente todo o lado ocidental, possui radiação solar global diária média anual entre 5,5 e 6,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Para implantação de sistemas fotovoltaicos a região oeste é considerada a mais ideal devido a alta radiação solar (entre 6,0 e 6,5 kWh/m<sup>2</sup>) e outros aspectos a serem considerados, como: declividade inferior a 3% e contínua (subregião ao noroeste), recursos hídricos de boa qualidade, abundantes e bem distribuídos, pouca área com alta aptidão agrícola e quantidade reduzida de unidades de conservação, e cobertura de linhas de transmissão adequada (CEMIG, 2012).

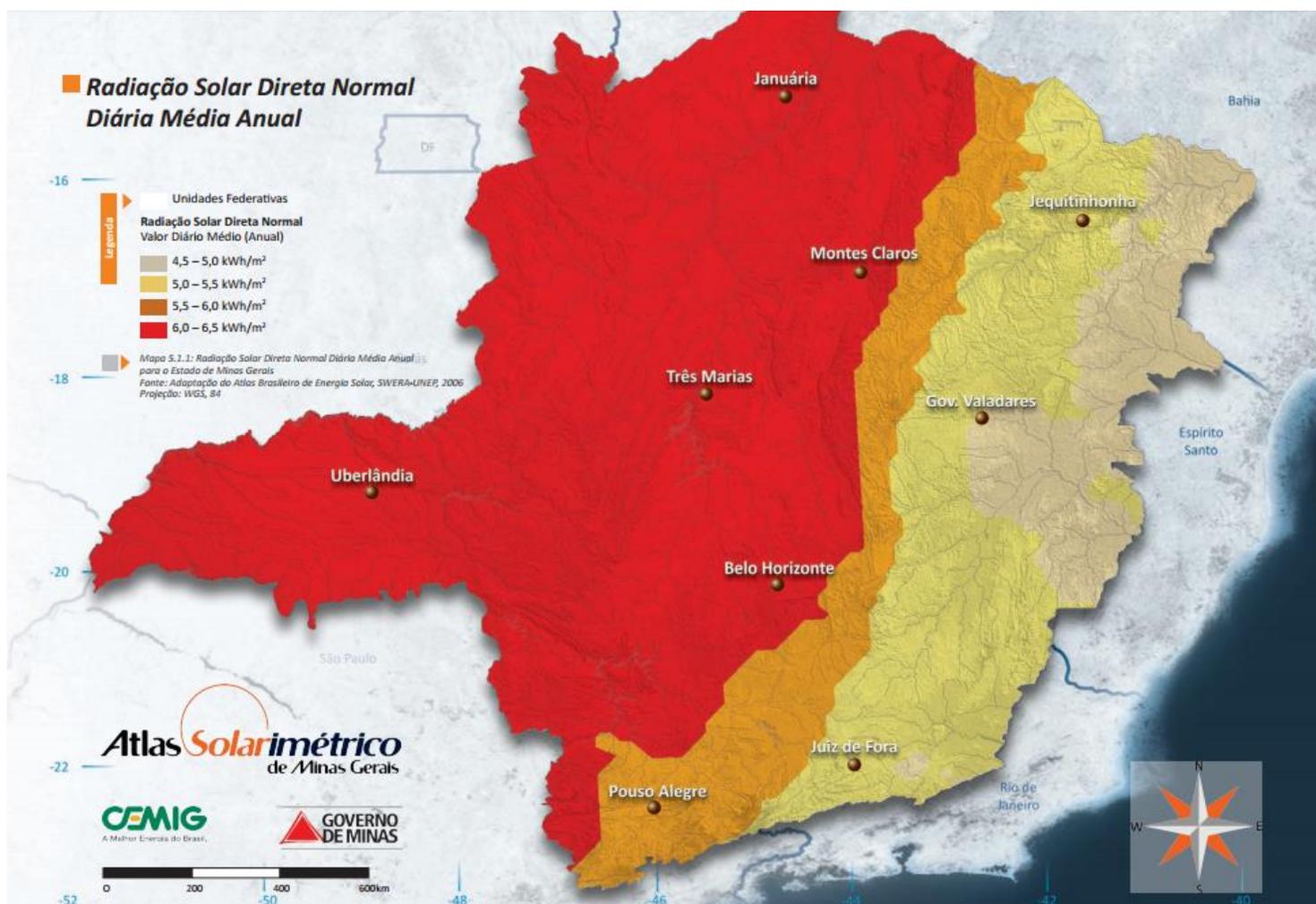


Figura 14 - Radiação solar direta normal diária média anual para o estado de Minas Gerais. Figura extraída de (CEMIG, 2012).

Portanto, considerando os aspectos mencionados acima e tomando como referência os limites das microrregiões adotados pelo IBGE, tem-se as seguintes áreas consideradas as mais promissoras no estado de Minas Gerais (CEMIG, 2012):

1. Microrregião de Janaúba;
2. Microrregião de Januária;
3. Microrregião de Pirapora e Unaí;
4. Microrregião de Pirapora e Paracatu;
5. Microrregião de Curvelo e Três Marias;
6. Microrregião de Patrocínio e Araxá.

O potencial eólico de Minas Gerais, calculado pela CEMIG, foi obtido a partir da integração dos mapas de velocidades médias anuais, fazendo-se uso de recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia de usinas eólicas no estado-da-arte mundial.

Os limiares mínimos de atratividade para investimento em geração eólica dependem dos contextos econômicos e institucionais de cada país, variando em termos de velocidade médias anuais dos ventos, entre 5,5 e 7,0 m/s. Entretanto, estima-se que velocidades médias anuais acima de 6 m/s já apontam condições favoráveis para o investimento em usinas eólicas (CEMIG, 2010).

As áreas com maior potencial eólico no estado podem ser verificadas na Figura 15. A seguir são apresentadas as regiões com as respectivas velocidades médias anuais do vento.

1. **Janaúba e Grão Mogol:** superam a meta de 7,5 m/s (a 75 m);
2. **Montes Claros:** varia entre 7,0 e 8,0 m/s (a 75 m);
3. **Curvelo, Diamantina e Sete Lagoas:** aproximadamente 7 m/s (a 50 m);
4. **Triângulo Mineiro:** superior a 7 m/s (a 100 m).

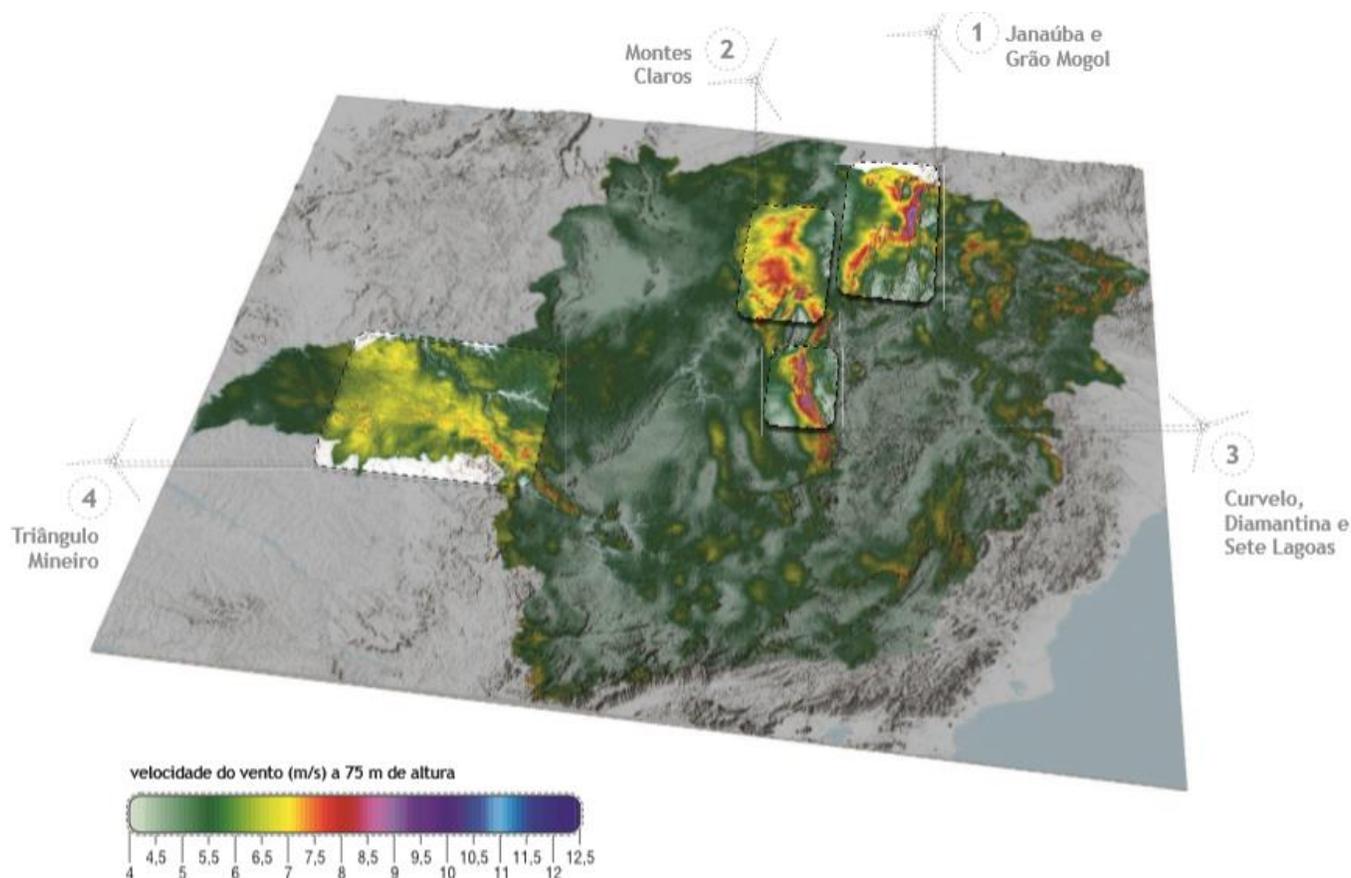


Figura 15 - Áreas mais promissoras para geração eólica em Minas Gerais. Figura extraída de (CEMIG, 2010).

Com base nas informações acima, a cidade de Janaúba/MG foi escolhida como base para o projeto de microrrede por apresentar resultados satisfatórios de potencial eólico e solar. A região de Janaúba é a mais dotada de radiação solar no estado de Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 a 2.400 kWh/m<sup>2</sup>, podendo atingir no verão 2.500 a 2.700 kWh/m<sup>2</sup> e possui também alta predominância de ventos, atingindo valores superiores a 7,5 m/s a 75 m de altura. Além disso, a maior parte do território tem baixa aptidão agrícola, baixa declividade e ausência de unidades de conservação (CEMIG, 2012).

De posse dos conceitos apresentados, no próximo capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho de conclusão de curso.

### 3. METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o dimensionamento de uma microrrede contendo as fontes de energia renováveis solar e eólica, tendo como base a cidade de Janaúba/MG, devido ao seu alto potencial para essas duas fontes, conforme citado na subseção 2.2.5.

#### 3.1 O *software* HOMER

Neste trabalho, são realizados e apresentados os cálculos pertinentes a microrredes e, em seguida, o sistema foi dimensionado através do *software* HOMER, criado especificamente para o projeto de microrredes.

A análise e implementação de sistemas de microgeração são consideradas complexas devido ao elevado número de possibilidades de projetos e incertezas em parâmetros principais como, a demanda da carga e o preço futuro de combustíveis. As fontes de energia renováveis aumentam ainda mais o grau de complexidade desses sistemas, devido as suas características de intermitência, sazonalidade e incerteza na disponibilidade dessas fontes. O *software* HOMER foi criado para lidar com esses desafios (LAMBERT *et al.*, 2006).

O HOMER é utilizado para implementar e analisar sistemas híbridos de potência que contêm diferentes elementos como, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, geradores hidráulicos, baterias, inversores, dentre outros. O programa possibilita que tanto sistemas conectados à rede elétrica quanto sistemas que operam isoladamente sejam simulados (OPENEI, 2016).

A Figura 16 mostra um fluxograma contendo as etapas de funcionamento do HOMER. Inicialmente, deve-se definir algumas variáveis de entrada como, informações sobre a carga, dimensionamento dos componentes e seus respectivos custos, disponibilidade dos recursos energéticos e dados utilizados na otimização do sistema. O HOMER usa estas entradas para simular diferentes configurações do sistema, podendo alterar também a combinação de componentes, sendo que os modelos obtidos são relacionados conforme o custo presente líquido (*Net Present Cost* - NPC) (NREL, 2011).

Posteriormente, é realizada a simulação a fim de verificar se a demanda necessária para atender a carga é atingida. Caso esta condição seja satisfeita, os custos e a produção de energia são avaliados e o sistema que possui o melhor custo-benefício é escolhido. Caso contrário, os componentes utilizados são redimensionados e inicia-se novamente o processo de simulação.

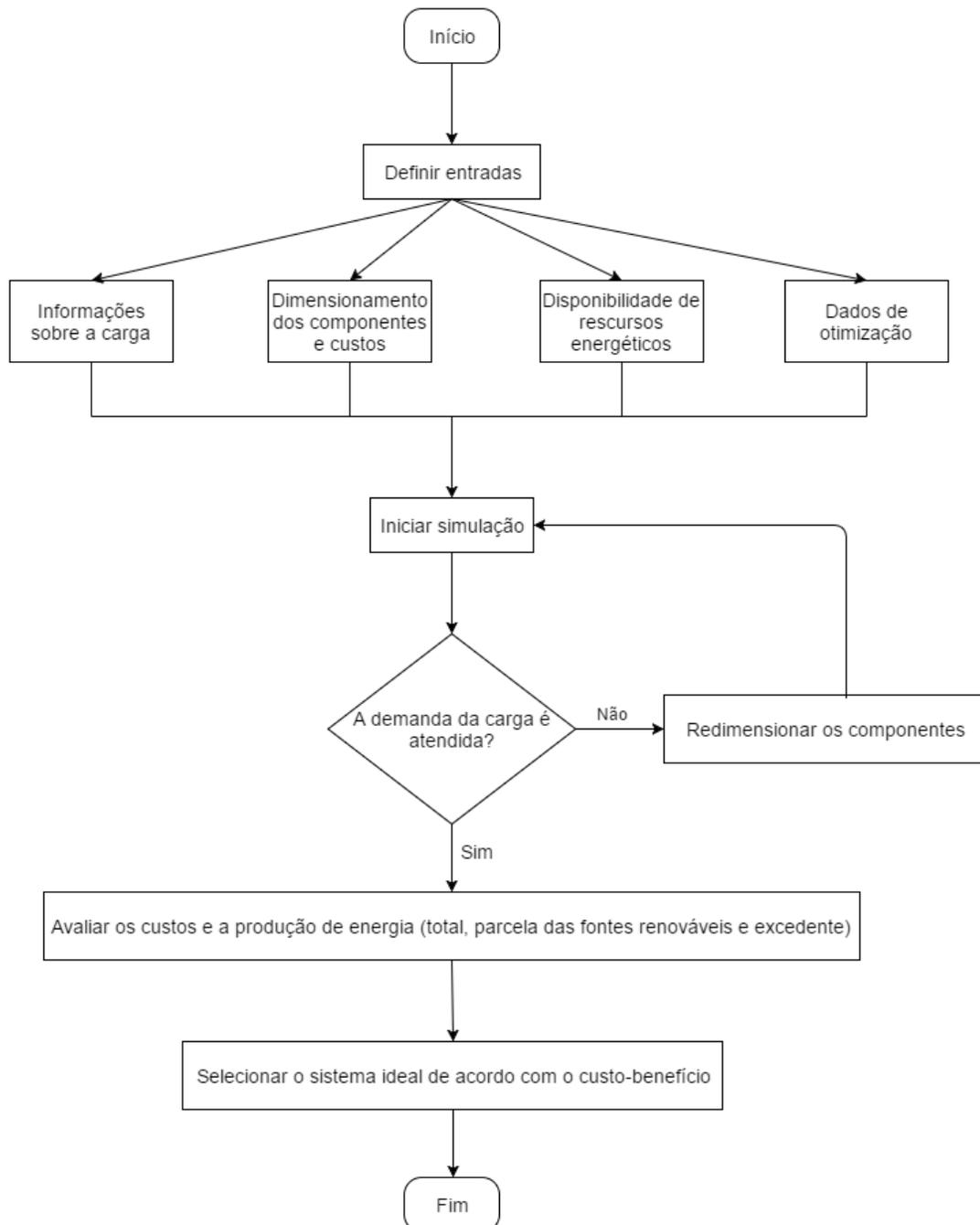


Figura 16 - Fluxograma mostrando o funcionamento do *software* HOMER

As três principais atividades realizadas pelo HOMER são: simulação, otimização e análise de sensibilidade. No processo de simulação, o programa analisa a viabilidade do sistema, que será positiva caso este consiga atender a demanda informada. Além disso, nessa etapa também são retornados os custos envolvidos. Na parte de otimização, o HOMER simula várias configurações do sistema com o objetivo de identificar uma opção que atenda as restrições impostas com o menor custo envolvido durante a vida útil do sistema. Por fim, na análise de sensibilidade, o programa simula diferentes cenários de otimização dentro dos limites especificados nas entradas, para estimar os efeitos de incertezas e mudanças em variáveis que o usuário não possui controle como, velocidade do vento e preço futuro de combustíveis (LAMBERT *et al.*, 2006).

A Figura 17 ilustra a relação entre simulação, otimização e análise de sensibilidade. A otimização envolve a simulação para representar a ideia que uma única otimização consiste de várias simulações. Do mesmo modo, a análise de sensibilidade envolve a otimização porque uma única análise de sensibilidade inclui múltiplas otimizações (LAMBERT *et al.*, 2006).

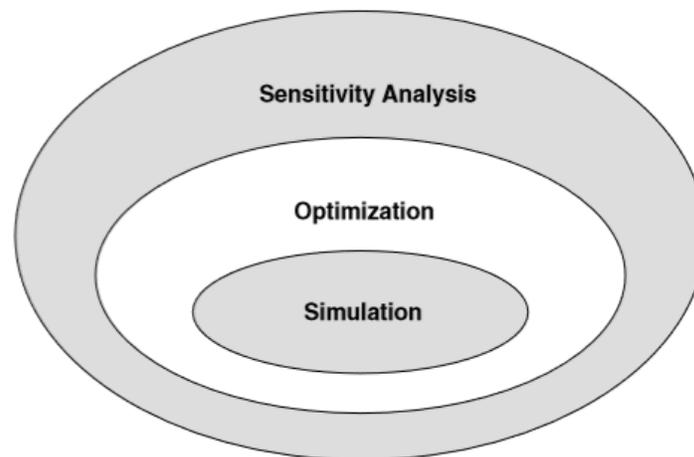


Figura 17 - Relação conceitual entre simulação, otimização e análise de sensibilidade. Figura extraída de (LAMBERT *et al.*, 2006).

Sendo assim, o *software* HOMER foi utilizado para dimensionar e simular o sistema proposto nesse trabalho de conclusão de curso, e que será exposto nesse capítulo. A Figura 18 mostra o sistema construído, sendo composto por painéis solares, turbinas eólicas, baterias,

inversor e a carga. O inversor foi utilizado para desempenhar as funções pertinentes ao sistema *Ingecon Hybrid MS*.

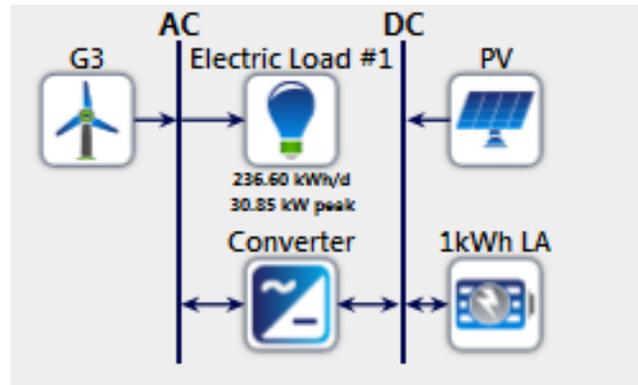


Figura 18 - Arquitetura de microrrede criada no *software* HOMER.

Na Figura 18, “G3” representa a turbina eólica, “*Electric Load*” é referente a carga do condomínio, “*Converter*” simboliza o inversor, “PV” representa o painel fotovoltaico e por fim, “1 kWh LA” é a simbologia utilizada para a bateria.

Na próxima subseção são apresentadas as principais variáveis de entrada do HOMER para a plena realização da simulação.

### 3.1.1 Variáveis de entrada no *software* HOMER

Algumas informações devem ser fornecidas ao programa antes que a análise do sistema seja iniciada. As variáveis introduzidas para este projeto são: custos associados a sistemas híbridos, disponibilidade dos recursos energéticos, demanda solicitada pela carga, e potências e quantidades dos componentes.

Os custos associados a sistemas híbridos incluem o custo com investimento inicial, o custo para reposição dos equipamentos e custos referentes a operação e manutenção (O&M). Os custos do investimento inicial referem-se a aquisição e instalação de equipamentos, gastos com projetos e transporte de materiais. Já o custo resultante da reposição de equipamentos é obtido quando estes atingem a vida útil máxima informada pelo fabricante, sendo necessário sua substituição. E por fim, tem-se os custos de operação e manutenção que são despesas fixas,

como pagamento de operadores, gastos com combustível e procedimentos de manutenção (PINHO et al., 2008). A Tabela 2 mostra os valores de custos utilizados para o sistema em análise.

Tabela 2 - Custos referentes a microrrede com as fontes de energia eólica e solar.

Componentes	Custo inicial	Custo de reposição	Custo O&M (\$/ano)
Turbina eólica	\$12.585,00/un.	\$12.585,00/un.	\$225,00
Painel fotovoltaico	\$3.463,00/kW	\$3.463,00/kW	\$19,00
Inversor	\$1.000,00/kW	\$1.000,00/kW	\$10,00
Banco de baterias	\$1.500,00/un.	\$1.500,00/un.	\$15,00

Tabela adaptada de (NREL, 2016).

A disponibilidade dos recursos energéticos afeta o comportamento e a eficiência do sistema, uma vez que as fontes determinam a produção e o tempo de operação da microrrede. Sendo assim, deve ser feita uma análise cautelosa do potencial energético para a área onde se deseja implantar o sistema. Para o projeto em análise, é necessário que os dados de irradiância solar e velocidade média anual do vento sejam fornecidas. Os valores de irradiância solar ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$ ) para cada mês do ano e a velocidade média anual do vento (m/s) a uma altura de 50 m para a cidade de Janaúba/MG, podem ser vistos na Figura 19 e Figura 20, respectivamente. Esses dados podem ser consultados em (CRESESB EÓLICA, 2015) e (CRESESB SOLAR, 2015). Por meio das coordenadas geográficas do local de interesse, é possível consultar o seu potencial eólico e solar.



Figura 19 - Irradiância média diária para a cidade de Janaúba. Figura obtida através do software HOMER.

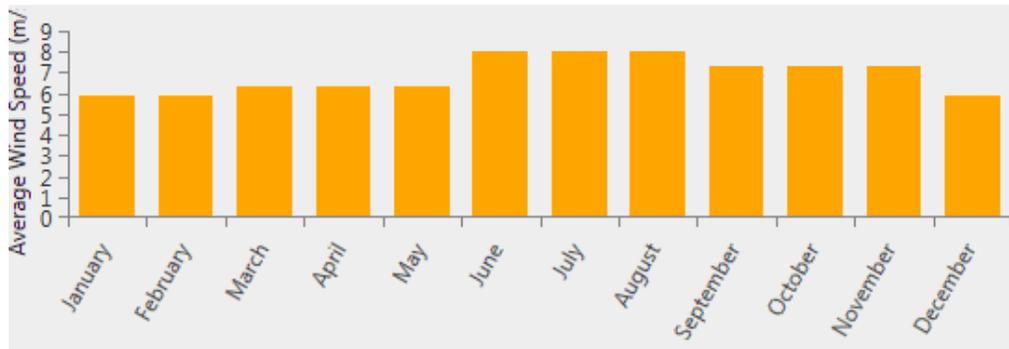


Figura 20 - Velocidade média anual do vento em Janaúba. Figura obtida através do *software* HOMER.

A próxima informação solicitada pelo programa é referente à demanda necessária para atender a carga. Essa entrada descreve a demanda de energia elétrica que o sistema deve atender em um determinado intervalo de tempo. Como o consumo horário do condomínio não é conhecido, construiu-se um diagrama diário da potência consumida que fosse equivalente a energia média diária calculada. A Figura 21 mostra (a) a curva referente ao consumo diário do condomínio e (b) o valor máximo da demanda mensal solicitada.

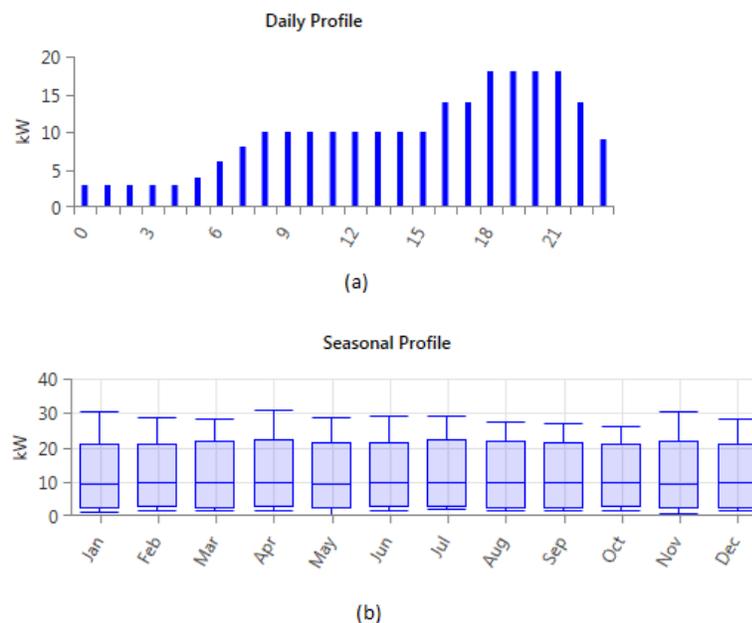


Figura 21 - (a) Consumo diário do condomínio em kW. (b) Máxima demanda mensal solicitada em kW. Figura obtida através do *software* HOMER.

Por meio dos dados de entrada, o HOMER consegue encontrar a melhor configuração para o sistema através do seu processo de otimização. Além desse tipo de análise, o programa também realiza um estudo de sensibilidade, no qual ele é capaz de simular vários cenários de otimização de acordo com diferentes entradas. A Figura 22 mostra os valores utilizados de potência e quantidade dos componentes na análise de sensibilidade do sistema. Utilizando esses valores de entrada, o HOMER realizará várias simulações e retornará a melhor solução capaz de atender a carga no menor custo possível.

Converter Capacity (kW)	1kWh LA Strings (#)	PV Capacity (kW)	G3 Quantity (#)
100	15	28	8
200	20	30	9
	30	35	10
	40	40	12

Figura 22 - Quantidade e potência dos componentes utilizados na análise de sensibilidade. Figura obtida através do *software* HOMER.

Na próxima seção são descritos os detalhes do sistema de microrrede desenvolvido, contendo especificações sobre demanda e parcela de geração de cada fonte.

### 3.2 Características do sistema de microrrede desenvolvido

Os condomínios residenciais apresentam alto consumo de energia elétrica, que tende a aumentar cada vez mais devido a crescente utilização de aparelhos elétricos, podendo-se destacar elevadores, portões automáticos e bombas d'água, que são considerados equipamentos de alto consumo. Sendo assim, o projeto de microrrede apresentado nesse trabalho é dimensionado tomando como base um condomínio contendo trinta e seis residências.

O primeiro passo para o dimensionamento de uma microrrede é determinar a demanda de energia necessária para atender a carga. Entretanto, seria extremamente complicado a obtenção dos dados pertinentes ao consumo de energia por casa de maneira precisa. Sendo

assim, utilizou-se uma maneira alternativa para o cálculo da demanda do condomínio. Primeiramente, determinou-se o número de pessoas por residência por meio de sorteio aleatório, obtido através de um programa desenvolvido no MATLAB. Segundo dados do IBGE, a média de moradores por domicílio para a região Sudeste é de 2,92 (IBGE, 2015). Portanto, o sorteio foi feito considerando um intervalo entre 2 e 6 moradores para que o resultado final fosse o mais balanceado possível. O número total de pessoas residentes no condomínio foi de 130. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 23, nos quais o número em cada quadrado indica a quantidade de moradores obtida por residência.

<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>2</b>		
<b>4</b>	<b>3</b>		

Figura 23 - Resultados obtidos para o número de moradores por residência, através de um programa de sorteio aleatório desenvolvido no MATLAB.

O consumo de energia elétrica por pessoa no ano de 2014 era de aproximadamente 653 kWh/ano (WEC, 2016). Conhecendo o número de pessoas que moram no condomínio e o consumo de energia elétrica por pessoa, é possível estimar a demanda mensal total, que neste caso é de 7,075 MWh/mês.

Considerando um possível aumento de carga no condomínio futuramente, o sistema será sobredimensionado em 15% do seu valor atual. Portanto a nova demanda será 8,2 MWh/mês.

Além disso, deve-se considerar as perdas obtidas para sistemas que utilizam bancos de baterias como forma de armazenamento de energia, correspondentes a um percentual de 35% (NEOSOLAR ENERGIA, 2016). Portanto, a demanda final será de 11,07 MWh/mês.

O próximo passo é dimensionar o sistema contendo as fontes renováveis. Após ser feita uma análise de alguns fatores como, irradiância solar e velocidade média do vento, para a cidade de Janaúba/MG, conclui-se que esta possui potencial eólico superior ao solar. Com isso, por decisão do projetista, o sistema eólico será responsável pelo fornecimento de 65% da demanda total, resultando em uma geração de 7,20 MWh, e os 35% restantes serão fornecidos pelo sistema fotovoltaico, correspondente a 3,87 MWh mensais.

Na próxima seção é feito o dimensionamento do sistema eólico, contendo especificações do tipo de turbina utilizada e do potencial eólico da região de Janaúba/MG.

### 3.3 Dimensionamento do sistema eólico

A turbina eólica escolhida para dimensionamento do sistema é da marca *Whisper* e suas principais características estão relacionadas na Tabela 3. A escolha foi baseada na baixa velocidade inicial do vento necessária para que esta entre em operação, resultando em uma produção maior e diminuindo riscos de indisponibilidade de energia.

Tabela 3 - Características da turbina eólica escolhida.

<b>Modelo</b>	Whisper 500
<b>Diâmetro do rotor</b>	4,5 m
<b>Área Varrida</b>	15,90 m <sup>2</sup>
<b>Potência máxima</b>	3,2 kW a 12 m/s
<b>Velocidade mínima de funcionamento</b>	3,4 m/s
<b>Velocidade máxima de funcionamento</b>	55 m/s

Tabela adaptada de (SOUTHWEST WINDPOWER, 2012).

A Tabela 4 mostra a velocidade média trimestral do vento para a cidade de Janaúba/MG a uma altura de 50 m. A fim de garantir que haja energia disponível também nos meses de menor recurso, a velocidade média utilizada nos cálculos será de 5,9 m/s, valor registrado nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

Tabela 4 - Velocidade média do vento para uma altura de 50 m.

<b>Velocidade média do vento a 50 m de altura (m/s)</b>				
Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
5,9	6,34	8,03	7,33	6,9

Tabela adaptada de (CRESESB EÓLICA, 2015).

A energia mensal fornecida por esse modelo de turbina pode ser obtida pela Figura 24. Como mostrado, não existe um valor exato de energia correspondente a uma velocidade de 5,9 m/s. Entretanto, o valor de energia pode ser obtido realizando uma interpolação das energias correspondentes às velocidades de 5,4 m/s e 6,3 m/s. O valor encontrado foi de 649 kWh/mês.

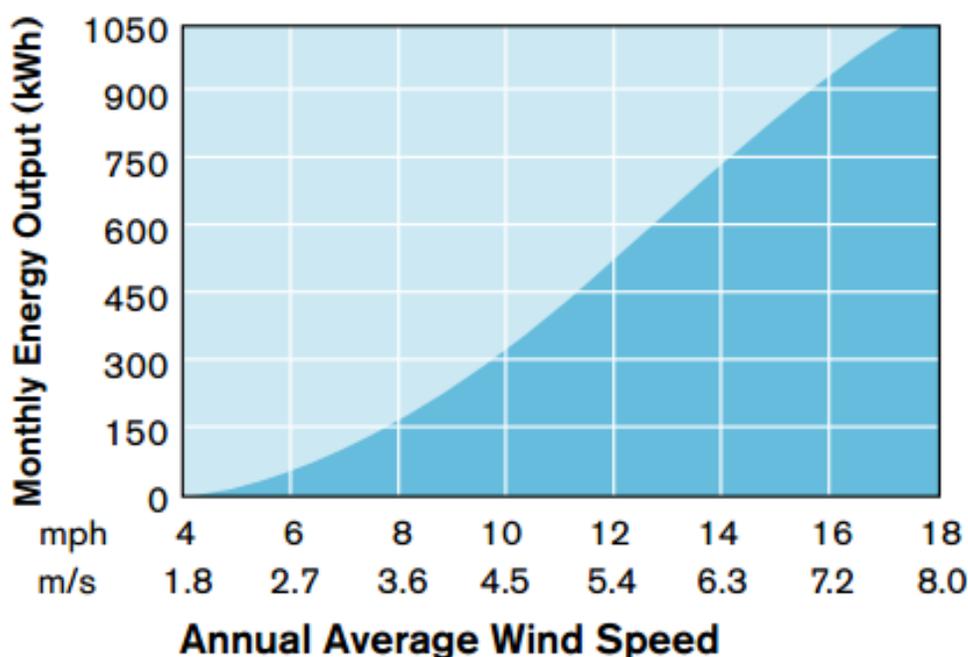


Figura 24 - Energia mensal gerada pela turbina em função da velocidade média anual do vento. Figura extraída de (SOUTHWEST WINDPOWER, 2012).

Como mencionado anteriormente, o sistema eólico é responsável por 65% da demanda do condomínio, o que equivale a 7,2 MWh. Conhecendo a energia total necessária para atender o condomínio e a energia gerada por uma turbina, é possível calcular o número de turbinas do sistema, através da seguinte expressão:

$$N_{turb} = \frac{E_{total}}{E_{turb}} = \frac{7.200}{649} \cong 11 \quad (2)$$

onde,  $N_{turb}$  é o número de turbinas,  $E_{total}$  é a energia total mensal em kWh e  $E_{turb}$  é a energia gerada por uma turbina em kWh.

A próxima seção contém informações sobre o potencial solar da cidade de Janaúba/MG, as características do módulo fotovoltaico utilizado e o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

### 3.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O valor da produção de potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos depende de alguns fatores, sendo estes a irradiância que atinge o painel, a sua inclinação e o rendimento.

Os valores mensais da irradiância solar para a cidade de Janaúba são mostrados na Tabela 5. Os valores indicados são obtidos para uma inclinação dos painéis solares de 15°, sendo que essa angulação resulta na maior média anual da irradiância solar.

Tabela 5 - Irradiação solar diária média para a cidade de Janaúba/MG.

Irradiação solar diária média (kWh/m <sup>2</sup> .dia)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,33	5,42	4,58	4,64	4,69	4,19	4,58	5,56	5,19	5,75	5,28	5,56

Tabela adaptada de (CRESESB SOLAR, 2015).

O módulo fotovoltaico utilizado no dimensionamento é da marca *SunPower*, modelo SPR-440NE-WHT-D, com potência nominal de 440 W. O módulo escolhido apresenta

eficiência nominal satisfatória, superando a marca de 21% (POSHARP, 2016). Suas características elétricas podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características elétricas do módulo.

<b>Potência máxima</b>	440 W
<b>Tensão de máxima potência</b>	72,9 V
<b>Corrente de máxima potência</b>	6,04 A
<b>Tensão de circuito aberto</b>	86,5 V
<b>Corrente de curto circuito</b>	6,5 A
<b>Área do módulo</b>	2,16 m <sup>2</sup>
<b>Eficiência nominal</b>	21,3%

Tabela adaptada de (POSHARP, 2016).

Como pode ser visto na Tabela 5, o mês de março apresentou o menor valor registrado de irradiância solar quando comparado aos outros meses, sendo de 4,61 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Portanto, tem-se cerca de 4,61 horas de sol pleno para o mês mais crítico do ano. O valor de irradiância mencionado será utilizado no cálculo da energia produzida pelo módulo e também para calcular a potência mínima do sistema, garantindo assim o seu pleno funcionamento durante todos os meses do ano. Como mencionado na seção anterior, o sistema fotovoltaico deve fornecer 3,87 MWh/mês para a carga, resultando em uma geração diária de 129,15 kWh. Sendo assim, tem-se que o valor para a potência mínima do sistema pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{129,15 \text{ kWh}}{4,61 \text{ h}} = 28 \text{ kW} \quad (3)$$

O cálculo da energia produzida pelo módulo pode ser realizado pela Eq.(4) (VILLALVA; GAZOLI, 2012),

$$E_p = E_s A_M \eta_M \quad (4)$$

onde,  $E_p$  é a energia produzida pelo módulo diariamente em Wh,  $E_s$  é a irradiância diária em Wh/m<sup>2</sup>/dia,  $A_M$  é a área da superfície do módulo em m<sup>2</sup> e  $\eta_M$  é a eficiência do módulo.

Considerando os valores de área e eficiência do módulo sendo 2,16 m<sup>2</sup> e 21,3%, respectivamente, e a irradiância mínima registrada de 4,61 kWh/m<sup>2</sup>.dia, a energia produzida mensalmente por um módulo é 63,63 kWh.

Utilizando a equação 5 é possível calcular o número de módulos necessários para se obter uma geração mensal de energia de 3,87 MWh. Sendo assim, aplicando os dados obtidos, conclui-se que são necessários 60 módulos na instalação fotovoltaica para atender a demanda.

$$N_p = \frac{E_{SISTEMA}}{E_{MÓDULO}} \quad (5)$$

onde,  $N_p$  é o número de módulos da instalação fotovoltaica,  $E_{SISTEMA}$  é a energia produzida pelo sistema em kWh e  $E_{MÓDULO}$  é a energia produzida por um módulo em kWh.

A forma mais balanceada encontrada para a disposição dos módulos fotovoltaicos, levando em consideração o sistema de conexão para microrredes que será descrito a seguir, foi a seguinte:

- 6 módulos conectados em série por *string*;
- 10 *strings* em paralelo;

Na próxima seção é apresentado o sistema *Ingecon Hybrid MS*, que desempenha um papel importante na implementação de microrredes.

### 3.5 O sistema *Ingecon Hybrid MS*

O sistema *Ingecon Hybrid MS* foi implementado para operar desconectado da rede elétrica, e fornecer tensão AC utilizando energia proveniente das fontes renováveis solar e eólica. Além disso, esse sistema utiliza baterias como meio de armazenamento e pode ser conectado a um gerador de segurança (*backup*) capaz de fornecer energia para a carga a qualquer momento. Este gerador somente é utilizado quando a energia proveniente das fontes renováveis e/ou das baterias não é suficiente para atender a carga. Além disso, este pode ser um gerador a diesel ou até mesmo a rede elétrica convencional. Sendo assim, o sistema híbrido

pode funcionar conectado ou não a rede elétrica. A Figura 25 mostra a configuração do sistema *Ingecon Hybrid MS* com seus respectivos blocos de entrada e saída.



Figura 25 - O sistema *Ingecon Hybrid MS* indicando suas entradas e saídas. Figura extraída de (INGETEAM, 2016).

Informações detalhadas sobre o sistema *Ingecon Hybrid MS* podem ser encontradas no manual do fabricante (INGETEAM ENERGY S.A, 2010). Entretanto, o Quadro 1 mostra resumidamente as principais especificações técnicas e detalhes para cada módulo.

Quadro 1 - Especificações para cada módulo.

<b>Módulo</b>	<b>Especificações técnicas</b>	<b>Detalhes do módulo</b>
Bateria	<p>Potência máxima: 30 kW            Limites de tensão: 240 a 500 Vdc            Corrente máxima: 100 Adc</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controla a carga e descarga do banco de baterias;</li> <li>- Controla a comunicação com os outros módulos, supervisiona o status de todas as entradas e gerencia a permissão para operar;</li> </ul>
Inversor	<p>Potência: 30 kVA            Limites de tensão: 380 a 430 Vac            Frequência: 50-60 Hz</p>	<p>O inversor terá as seguintes funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversor;</li> <li>- Retificador;</li> <li>- Suporte para o gerador de segurança;</li> </ul>
Solar	<p><b>Dados para cada entrada</b>            Potência máxima: 15 kW            Limites de tensão: 150 a 700 Vdc            Corrente máxima: 30 Adc</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contém três entradas de 15 kW;</li> <li>- As entradas podem ser configuradas como: três entradas independentes ou três entradas em paralelo, funcionando como entrada única de 45 kW (90 Adc).</li> </ul>
Eólica	<p><b>Dados para cada entrada</b>            Potência máxima: 15 kW            Limites de tensão: 70 a 495 Vdc            Corrente máxima: 24 Adc</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contém três entradas independentes para turbinas eólicas;</li> <li>- As entradas podem ser configuradas como: três entradas separadas, entradas 1 e 2 em paralelo (30 kW) e a terceira separada (15 kW), e as três entradas em paralelo (45 kW).</li> </ul>

Quadro adaptado de (INGETEAM, 2016).

Por fim, com a apresentação da metodologia necessária para o dimensionamento da microrrede eólica e solar, é apresentado no Capítulo 4, as discussões e os resultados obtidos com o sistema proposto neste trabalho de conclusão de curso.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões relacionadas a simulação realizada pelo *software* HOMER. São apresentados também, detalhes e características elétricas de cada parte constituinte do sistema considerado ideal como, as fontes renováveis, as baterias e o inversor.

### 4.1 Resultados da simulação no *software* HOMER

Após a inserção dos dados de entrada no HOMER, o programa foi simulado e encontrou-se uma solução ideal para a microrrede. Por meio das simulações realizadas, foi possível perceber que uma solução é apontada apenas quando o sistema consegue suprir a demanda especificada. A partir disso, várias soluções são retornadas, sendo estas ordenadas de acordo com o custo presente líquido (NPC), que representa todos os custos envolvidos durante o tempo de vida útil do sistema. A Figura 26 mostra a melhor solução encontrada pelo programa.

	PV (kW)	G3	1kWh LA	Converter (kW)	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)
	28.0	9	300	100	\$1.42	\$2.07M	\$101,685	\$760,229

Figura 26 - Solução ideal calculada pelo HOMER. Figura obtida através do *software* HOMER.

Como pode ser visto na Figura 26, a potência do sistema fotovoltaico (“PV”) é igual a calculada na seção anterior (28 kW). O programa sugere que sejam utilizadas 9 turbinas eólicas (“G3”) para o sistema eólico ao invés de 11, como calculado anteriormente. Tal fato pode ser explicado pois, no cálculo feito para determinar o número de turbinas eólicas a velocidade média do vento considerada é a menor registrada no ano, entretanto o programa considera as demais velocidades médias mensais que apresentam valores superiores e consequentemente maior geração. O número de baterias (“1 kWh LA”) ideal é de 300, resultando em uma autonomia da microrrede de aproximadamente 12 horas, ou seja, caso haja alguma falha no

sistema e a geração seja comprometida, o banco de baterias será capaz de fornecer energia para a carga por um período de até 12 horas. O conversor (“*Converter*”) possui potência de 100 kW, valor máximo que o sistema *Ingecon Hybrid MS* suporta. O custo médio da energia gerada (“COE”) é de \$1,42 por kWh e o sistema é capaz de fornecer 143.798 kWh/ano, referente a uma geração diária de 399,44 kWh. Sendo assim, pode-se concluir que a microrrede é capaz de suprir a demanda do condomínio (369 kWh/dia).

O sistema eólico é responsável por 66,5% da energia total gerada, enquanto o sistema fotovoltaico fornece 33,5%. Esta diferença é obtida devido ao potencial eólico da região de Janaúba/MG ser superior ao solar, conforme exposto anteriormente. Tal diferença pode ser comprovada pela Figura 27, que mostra a produção de energia mensal referente a cada fonte, eólica e solar. Cada coluna representa a produção mensal total dos dois sistemas, na qual a coluna verde indica a geração do sistema eólico e a coluna laranja indica a geração do sistema solar. Com isso, pode-se verificar na Figura 27, que a coluna verde representa aproximadamente 66,5% da produção total e os 33,5% restantes refere-se a coluna laranja.

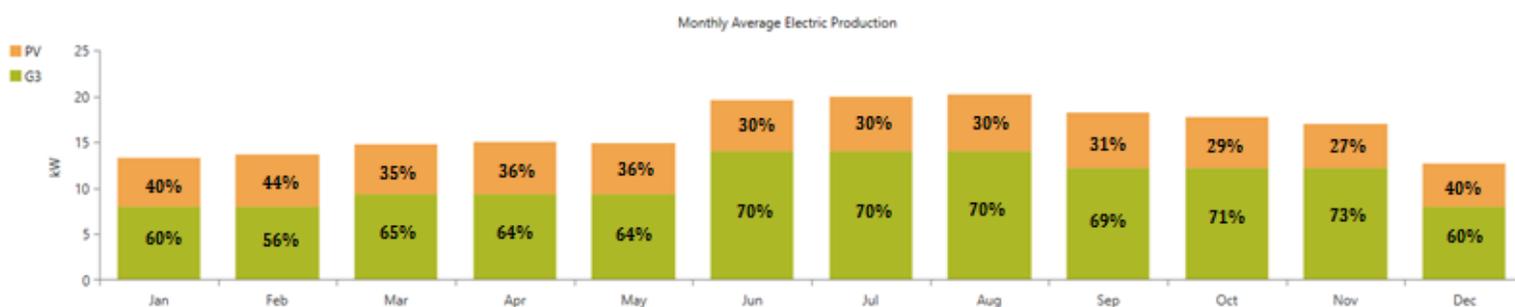


Figura 27 - Produção média mensal de energia obtida das fontes eólica e solar. Figura obtida através do *software* HOMER.

Como pode ser visto na Figura 28, a microrrede apresenta um excedente de energia produzido anualmente de 11,2%. Com isso, além do sistema ser capaz de suprir a demanda do condomínio, este possibilita que os consumidores forneçam energia elétrica para a rede local, gerando créditos com a concessionária que podem ser utilizados posteriormente. Neste caso, se houver necessidade de abastecimento por meio da distribuidora local, o valor das faturas de

energia elétrica pode ser reduzido por meio desses créditos, de acordo com a Resolução Normativa nº 687 da ANEEL de 2015 (ANEEL, 2015).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
Generic flat plate PV	48,167	33.50	AC Primary Load	113,006	100.00
Generic 3 kW	95,631	66.50	DC Primary Load	0	0.00
Total	143,798	100.00	Total	113,006	100.00

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	16,037.6	11.2
Unmet Electric Load	21,679.0	16.1
Capacity Shortage	30,582.2	22.7

Figura 28 - Geração elétrica obtida pela microrrede. Figura obtida através do *software* HOMER.

A capacidade do sistema fotovoltaico é de 28 kW e o maior valor de potência obtido na saída é de 26,8 kW. O sistema produz energia durante 4.406 horas/ano, o que equivale a aproximadamente 12 horas de operação por dia. Portanto, o período de funcionamento do sistema fotovoltaico é entre as 6 e 18 horas, período em que há recurso solar. A geração diária é de 131,96 kWh, o que representa 35% da demanda solicitada. Apesar do elevado número de horas que o sistema funciona, o sistema fotovoltaico não apresenta um nível satisfatório de geração. Isso acontece pois, a irradiância solar registrada na cidade de Janaúba/MG, em determinados períodos, não apresenta índices elevados. A Figura 29 mostra os resultados obtidos na simulação para o sistema fotovoltaico.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated Capacity	28.00	kW	Minimum Output	0.00	kW
Mean Output	5.50	kW	Maximum Output	26.8	kW
Mean Output	131.96	kWh/d	PV Penetration	35.8	%
Capacity Factor	19.64	%	Hours of Operation	4,406	hrs/yr
Total Production	48,166.86	kWh/yr	Levelized Cost	0.167	\$/kWh

Figura 29 - Desempenho do sistema fotovoltaico. Figura obtida através do *software* HOMER.

A potência instalada do sistema eólico é de 27 kW, sendo que este fornece diariamente o equivalente a 265,64 kWh/dia. Com isso, este sistema é capaz de fornecer até 72% da energia utilizada no condomínio diariamente. De acordo com a simulação, o sistema opera durante 7.607 horas por ano, totalizando 21 horas por dia. Como a geração fotovoltaica fica comprometida em determinados períodos, o sistema eólico é capaz de atender grande parte da demanda durante estes intervalos. Tais informações podem ser confirmadas pela Figura 30.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	27.00	kW
Mean Output	10.92	kW
Capacity Factor	40.43	%
Total Production	95,631.17	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0.00	kW
Maximum Output	32.40	kW
Wind Penetration	71.00	%
Hours of Operation	7,607.00	hrs/yr
Levelized Cost	0.13	\$/kWh

Figura 30 - Desempenho do sistema eólico. Figura obtida através do *software* HOMER.

É possível perceber que o sistema *Ingecon Hybrid MS* utilizado é capaz de suportar a energia gerada pelo sistema, pois de acordo com seus dados técnicos, o componente suporta até 45 kW de geração fotovoltaica e 45 kW de geração eólica. Como pode ser visto na Figura 31, a energia que entra no inversor é de 49.045,95 kWh/ano, enquanto na saída tem-se 44.141,36 kWh/ano. Portanto, o total de perdas no inversor é de 10%.

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	100.00	90.00	kW
Mean Output	5.04	1.63	kW
Minimum Output	0.00	0.00	kW
Maximum Output	39.55	23.55	kW
Capacity Factor	5.04	1.63	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of Operation	5,462.00	2,191.00	hrs/yr
Energy Out	44,141.36	14,301.99	kWh/yr
Energy In	49,045.95	16,825.87	kWh/yr
Losses	4,904.60	2,523.88	kWh/yr

Figura 31 - Resultados obtidos para o inversor. Figura obtida através do *software* HOMER.

A utilização do sistema de armazenamento contendo baterias é importante para que a confiabilidade no fornecimento de energia seja aumentada. Sendo assim, quando a geração proveniente das fontes renováveis não for suficiente para atender a demanda, as baterias serão utilizadas. Quanto maior o número de baterias, maior será a autonomia do sistema e conseqüentemente, o custo se tornará mais elevado. Como mostra a Figura 32, utilizando-se um total de 300 baterias, tem-se uma autonomia de quase 12 horas. Além disso, a energia recebida pelas baterias foi de 37.435,61 kWh/ano e a fornecida a carga foi 30.109,61 kWh/ano. Portanto, o total de perdas obtido no sistema de armazenamento foi de 19%.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Autonomy	11.72	hr	Average Energy Cost	0.00	\$/kWh
Storage Wear Cost	3.54	\$/kWh	Energy In	37,435.61	kWh/yr
Nominal Capacity	300.24	kWh	Energy Out	30,109.61	kWh/yr
Usable Nominal Capacity	180.14	kWh	Storage Depletion	180.14	kWh/yr
Lifetime Throughput	141,960.00	kWh	Losses	7,145.85	kWh/yr
Expected Life	4.22	yr	Annual Throughput	33,663.57	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Batteries	300.00	
String Size	20.00	
Strings in Parallel	15.00	
Bus Voltage	240.00	

Figura 32 - Resultados obtidos para o banco de baterias. Figura obtida através do *software* HOMER.

Antes da implementação de qualquer projeto, é de extrema importância realizar o levantamento dos custos dos componentes a serem utilizados. Na próxima seção, são descritas as quantidades e preços estimados dos equipamentos e acessórios utilizados nesse projeto de microrrede.

## 4.2 Análise econômica do projeto

Uma vez finalizado o dimensionamento da microrrede e conhecendo os principais componentes do sistema, é possível estimar o investimento que este tipo de projeto requer. A Tabela 7 mostra a quantidade dos equipamentos utilizados e seus respectivos preços. Não foi disponibilizado pelo fabricante o valor do sistema *Ingecon Hybrid MS*, portanto, para se obter um valor final adequado, foi utilizado o preço de um equipamento com funcionalidade similar, o inversor Kaco.

Como pode ser visto na Tabela 7, o preço total do projeto é de aproximadamente R\$ 543.427,50, lembrando que este levantamento não considera o custo de mão de obra. Considerando que o condomínio possui um total de trinta e seis residências, cada uma deve contribuir com um valor de R\$ 15.095,20.

Tabela 7 - Quantidade e custo estimado dos equipamentos da microrrede.

Item	Descrição	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
1	Turbina eólica Whisper 500, <i>Southwest Windpower</i>	9	R\$ 24.869,25	R\$ 223.823,25
2	Kit torre + cabos + acessórios para turbina eólica	9	R\$ 2.831,85	R\$ 25.486,65
3	Painel solar modelo SPR-440NE-WHT-D, <i>Sunpower</i>	60	R\$ 1.500,00	R\$ 90.000,00
4	Suporte de alumínio para módulos solares	4	R\$ 2.579,29	R\$ 10.317,60
5	Baterias 105 Ah, Moura	300	R\$ 550,00	R\$ 165.000,00
6	Inversor Kaco 50 kW	1	R\$ 28.800,00	R\$ 28.800,00
			<b>Total:</b>	<b>R\$ 543.427,50</b>

A fim de estimar após quanto tempo o investimento feito no projeto de microrrede seria retornado, realizou-se um cálculo aproximado de quanto o condomínio pagaria de faturamento de energia elétrica, caso a demanda necessária fosse contratada junto à CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

Para o caso de condomínios residenciais, a estrutura tarifária convencional é a mais indicada, considerando que o período de maior utilização de energia elétrica ocorre entre as 18 e 21 horas. Utilizando esse tipo de tarifação, o faturamento é feito considerando tanto a demanda contratada quanto o consumo (CEMIG, 2011).

De acordo com tarifas da estrutura convencional fornecidas pela CEMIG, referentes ao mês de outubro de 2016, a tarifa referente a demanda é de R\$ 42,29/kW enquanto a de consumo é de R\$ 446,09/MWh, incluindo todos os impostos aplicáveis (CEMIG, 2016).

Utilizando os valores mencionados, concluiu-se que o condomínio pagaria aproximadamente uma quantia de R\$ 7.264,38 mensalmente. Sendo assim, tem-se uma estimativa do valor do *payback* referente a este projeto de sete anos, para os custos dos equipamentos.

Considerando a demanda anual do condomínio sendo 132,84 MWh, durante o período de pagamento do sistema, ou seja, os sete primeiros anos, os consumidores teriam uma economia de aproximadamente 11% ao ano.

Levando em consideração todos os benefícios envolvidos na utilização das fontes renováveis em sistemas de geração, o período de tempo estimado é relativamente baixo, uma vez que o sistema contribui para uma geração de energia de forma mais limpa, além de apresentar alta confiabilidade.

De posse de todas as características obtidas do projeto de microrrede, no próximo capítulo são apresentadas as conclusões desse trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

A geração distribuída é uma alternativa para atender a demanda de energia elétrica de forma eficiente e eficaz. Esta tecnologia contribui para que o abastecimento de energia se torne mais confiável, uma vez que esta diminui a dependência do sistema centralizado de geração. Além disso, a geração distribuída é uma opção a ser considerada diante da questão do crescimento de demanda pois, pode ser implementada em menores prazos e possui menor complexidade na liberação de projetos.

O objetivo principal desse trabalho foi dimensionar e simular uma microrrede, sistema considerado uma aplicação da geração distribuída. A simulação foi feita através do *software* HOMER, desenvolvido especificamente para a análise de microrredes. O projeto foi realizado com aplicação para um condomínio contendo um total de trinta e seis residências.

A princípio foi feito um estudo do potencial solar e eólico de Minas Gerais a fim de identificar as áreas mais promissoras. Algumas regiões foram consideradas e concluiu-se que a cidade de Janaúba/MG era ideal para este tipo de projeto devido às suas características geográficas e condições climáticas. O sistema eólico ficou responsável por fornecer a maior parte da demanda devido ao alto potencial detectado na região.

Por meio da simulação, pôde-se perceber que os dados da topologia considerada ideal para a microrrede eram semelhantes aos valores previamente calculados. Além disso, uma maior utilização do sistema eólico resultava em um custo presente líquido (NPC) menor. O sistema projetado possui autonomia de quase 12 horas, aumentando assim a sua confiabilidade.

Os resultados indicaram um excedente na produção de energia de 11,2% ao ano. Considerando que a microrrede pode operar paralelamente a rede elétrica convencional, esse excedente pode ser injetado na rede e gerar créditos para os condôminos, diminuindo assim o faturamento final de energia, de acordo com a Resolução Normativa da ANEEL nº 687.

Realizando uma análise econômica do sistema chegou-se a conclusão que o investimento inicial do projeto é de aproximadamente R\$ 543.427,50. Além disso, obteve-se uma estimativa do valor de *payback* de sete anos, para os custos dos equipamentos.

Portanto, conclui-se que o sistema analisado pode ser considerado eficaz, pois é possível suprir a demanda de energia elétrica necessária para atender o condomínio, oferecendo confiabilidade no abastecimento devido a sua autonomia. Além disso, a utilização de uma

microrrede na cidade de Janaúba/MG contribue para uma geração mais limpa de energia, aproveitando o potencial disponível das fontes renováveis.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se citar as seguintes possibilidades:

- Desenvolvimento de outros projetos de microrredes levando em conta outras microfontes;
- Aplicação da simulação em outros cenários, tais como, indústrias, áreas isoladas, dentre outros;
- Obtenção de *payback* para outros projetos considerando a degradação temporal da microrrede;
- Utilização do *software* HOMER para realizar um estudo comparativo de microrredes *on-grid* e *off-grid*, contendo diversas microfontes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, M. V. P. **Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica.** O Setor Elétrico, n. 71, p. 36-45, Dezembro 2011.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** 2012. 173 f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** ANEEL. Brasília: TDA Comunicação, p. 79-82. 2008.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687.** Agência Nacional de Energia Elétrica. 25 p. 2015.

ANEEL. **Capacidade de geração do Brasil.** Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 30 de maio de 2016.

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída - sistema de compensação de energia elétrica.** Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). 11 p. Brasília, 2014.

ANPROTEC. **Certi inaugura microrrede no Sapiens Parque.** Disponível em: <<http://anprotec.org.br/site/2016/02/fundacao-certi-inaugura-microrrede-no-sapiens-parque/>>. Acesso em: 23 de maio de 2016.

BOSO, A. C. M. R.; GABRIEL, C. P. C.; FILHO, L. R. A. G. **Análise de custos dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no Brasil.** ANAP Brasil, v. 8, n. 12, p. 57-66, 2015.

CARDOSO, A. **1,5 bilhão de pessoas vive sem energia elétrica no mundo.** Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/mundo/noticias/1-5-bilhao-de-pessoas-vive-sem-energia-eletrica-no-mundo>>. Acesso em: 28 de setembro de 2016.

CARVALHO, C. R. F. D. **Sistema fotovoltaico isolado: uma aplicação prática no Projeto Xapuri.** 2013. 46 f. Monografia - Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2013

CARVALHO, P. **Interrupção do fornecimento de energia é principal reclamação de consumidores.** Disponível em: <<http://www.folhabv.com.br/noticia/Interrupcao-do-fornecimento-de-energia-e-principal-reclamacao-de-consumidores/18631>>. Acesso em: 28 de setembro de 2016.

CEMIG. **Atlas Eólico Minas Gerais.** Companhia Energética de Minas Gerais. 84 p. Belo Horizonte, 2010.

CEMIG. **Manual de Gerenciamento de Energia.** Belo Horizonte, 2011. 19 p.

CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais.** Companhia Energética de Minas Gerais. 80 p. Belo Horizonte 2012.

CEMIG. **Valores de tarifas e serviços.** Disponível em: <[https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores\\_de\\_tarifa\\_e\\_servicos.aspx](https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx)>. Acesso em: 28 de outubro de 2016.

CEPEL, CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, 2014. 530 p.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. **Microgrids and active distribution networks.** 1. ed. Institution of Engineering and Technology, 2009.

CRESESB EÓLICA. **Potencial eólico - atlas do potencial eólico brasileiro.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 1 de setembro de 2016.

CRESESB SOLAR. **Potencial Solar.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 5 de setembro de 2016.

CRUZ, J. L. C. **Geração distribuída.** O Setor Elétrico, n. 93, p. 70-76, Outubro de 2013.

DINIZ, M. **No ano internacional da luz, 1.5 bilhão de pessoas vivem no escuro pelo mundo.** Disponível em: <<http://www.abc.com.br/tecnologia/2015/06/no-ano-internacional-da-luz-15-bilhao-de-pessoas-vivem-no-escuro-pelo-mundo>>. Acesso em: 23 de maio de 2016.

ENEL. **Coelce e Prátil equipam o primeiro condomínio do país com rede inteligente de energia.** Disponível em: <<http://enel.com.br/coelce-e-pratil-equipam-o-primeiro-condominio-do-pais-com-rede-inteligente-de-energia/>>. Acesso em: 23 de maio de 2016.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos dez anos (2015 a 2024).** 90 p. Rio de Janeiro, 2015.

GOMES, A. **Matriz cada vez mais diversificada.** O Setor Elétrico, n. 95, p. 52-59, Dezembro 2013.

GREENPEACE. **Revolução energética - a caminho do desenvolvimento limpo.** Hawái Gráfica e Editora. 8 p. Agosto, 2013.

IBGE. **Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira.** 137 p. Rio de Janeiro, 2015.

INEE. **O que é geração distribuída.** Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: 11 de maio de 2016.

INFRAROI. **Celesc inaugura usina de energia renovável em Florianópolis.** Disponível em: <<http://infraroi.com.br/celesc-inaugura-usina-de-energia-renovavel-em-florianopolis/>>. Acesso em: 23 de maio de 2016.

INGETEAM. **Ingecon Hybrid MS: an adaptable system for stand-alone grids and microgrids.** Catalog. 2016.

INGETEAM ENERGY S.A. **Ingecon Hybrid MS Installation Manual.** Navarra: Janeiro de 2010, 92 p.

IPCC. **Special report about renewable sources and climate change**. The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2012.

LAMBERT, T.; GILMAN, P.; LILIENTHAL, P. **Micropower system modeling with HOMER**. New Jersey: Copyright, 2006. p. 379-417.

LOPES, A.; MARCELINO, R. **Estudo de arte - sistemas de armazenamento de energia**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 19 p. 2013.

GOMES, A. **Matriz cada vez mais diversificada**. O Setor Elétrico, n 95, p. 52-59, Dezembro de 2013.

MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. Cap. 6, 654 p.

MENDONÇA, L. P. **Introdução às microrredes e seus desafios**. 2011. 78 f. Monografia - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.

MICROGRIDS AT BERKELEY LAB. **Examples of Microgrids**. Disponível em: <<https://building-microgrid.lbl.gov/examples-microgrids>>. Acesso em: 23 de maio de 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira**. Ministério de Minas e Energia. 31 p. Brasília, 2016.

NEOSOLAR ENERGIA. **Quanto produz um painel solar fotovoltaico?** Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/aprenda/perguntas-frequentes#perg12>>. Acesso em: 6 de setembro de 2016.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Getting started guide for HOMER legacy**. 28 p. Colorado, 2011.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **System Advisor Model (SAM)**. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/>>. Acesso em: 31 de outubro de 2016.

OPENEI. **HOMER**. Disponível em: <<http://en.openei.org/wiki/HOMER>>. Acesso em: 12 de setembro de 2016.

OUDALOV, A.; BUEHLER, T.; CHARTOUNI, D. **Utility scale applications of energy storage**. IEEE Energy Conference. p. 1-7. Atlanta, 2008.

PANORAMA COMERC. **Crescimento da matriz energética brasileira entre 2008 e 2015**. Disponível em: <<http://www.panoramacomerc.com.br/?p=2400>>. Acesso em: 20 de junho de 2016.

PASCHOALOTTI, L. E.; NELO, W. M. **Sistema cantareira - o desafio para atender regiões hidrográficas diferentes com uma possibilidade hídrica limitada**. Disponível em: <<http://aguasdobrasil.org/edicao-06/sistema-cantareira.html>>. Acesso em: 10 de maio de 2016.

PASSOS, R. S. D. **Estudo de caso do impacto da microgeração na tensão e nas perdas de um sistema de distribuição**. 2014. 69 f. Monografia - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.

PEGORIM, J. **Cantareira tem melhor verão em 5 anos**. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/noticia/2016/03/28/cantareira-tem-melhor-verao-em-5-anos-9326>>. Acesso em: 10 de maio de 2016.

PINHO, J. T. et al. **Sistemas híbridos: soluções energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ideorama Design e Comunicação Ltda, 2008.

PORTAL BRASIL. **Potencial hidrelétrico está entre os cinco maiores do mundo**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/potencial-hidreletrico-brasileiro-esta-entre-os-cinco-maiores-do-mundo>>. Acesso em: 17 de maio de 2016.

POSHARP. **SPR-440NE-WHT-D Solar Panel from SunPower.** Disponível em: <<http://www.posharp.com/photovoltaic/solarpanel.aspx?pid=3a096813-0e3a-44de-9a26-fc531f543916>>. Acesso em: 26 de outubro de 2016.

RAYTHEON. **How to build a power base.** Disponível em: <[http://www.raytheon.com/news/feature/power\\_tech.html](http://www.raytheon.com/news/feature/power_tech.html)>. Acesso em: 11 de maio de 2016.

REN21. **Renewables 2015 Global Status Report.** Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 80 p. 2015.

RIBEIRO, L. A. D. S. et al. **Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: the case of lençóis island.** IEEE Transactions on Sustainable Energy, New York, v. 2, n. 1, January 2011.

SILVA, F. L. D. **Análise do desempenho de uma microrrede com múltiplas unidades geradoras.** 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2011.

SILVEIRA, P. A. **Análise de microrredes - estudo de caso.** 2013. 65 f. Monografia - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

SINGH, T. C. et al. **Design features of energy storage systems for Green buildings: an economic comparison with off-grid and on-grid solutions.** International Research Journal of Engineering and Technology, Orissa, v. 03, n. 05, p. 38-42, Maio 2016. ISSN.

SOLAR HUB. **PV Module SPR-440NE-WHT-D Details.** Disponível em: <<http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/16984-SPR-440NE-WHT-D-SunPower>>. Acesso em: 5 de setembro de 2016.

SOUTHWEST WINDPOWER. **Whisper 500: Owner's Manual.** Flagstaff: 2012. 70 p.

SU, W.; WANG, J. **Energy management systems in microgrid operations**. The Electricity Journal, v. 25, n. 8, p. 45-60, Outubro de 2012.

UCSD. **Microgrid: keeping the lights on**. Disponível em: <<http://www.alumni.ucsd.edu/s/1170/emag/emag-interior-2-col.aspx?sid=1170&gid=1&pgid=4665>>. Acesso em: 14 de maio de 2016.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Grid-connected renewable energy systems**. Disponível em: <<http://energy.gov/energysaver/grid-connected-renewable-energy-systems>>. Acesso em: 10 de outubro de 2016.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica - conceitos e aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2012.

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). **Average electricity consumption of households per capita**. Disponível em: <<https://www.wec-indicators.enerdata.eu/electricity-use-per-capita.html>>. Acesso em: 1 de setembro de 2016.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION (WWEA). **Basics of power production**. Disponível em: <<http://www.wwindea.org/technology/ch01/estructura-en.htm>>. Acesso em: 31 de maio de 2016.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION (WWEA). **Worldwide wind market booming like never before: wind capacity over 392 gigawatt**. Disponível em: <<http://www.wwindea.org/hyr2015/>>. Acesso em: 31 de maio de 2016.