

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS – CAMPUS FORMIGA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
PEDRO HENRIQUE EDUARDO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA DA CIDADE DE FORMIGA/MG COM TRÊS CIDADES  
LOCALIZADAS EM PAÍSES REFERÊNCIAS: CHINA, JAPÃO E ALEMANHA**

**FORMIGA – MG  
2018**

**PEDRO HENRIQUE EDUARDO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA DA CIDADE DE FORMIGA/MG COM TRÊS CIDADES  
LOCALIZADAS EM PAÍSES REFERÊNCIAS: CHINA, JAPÃO E ALEMANHA**

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**

**2018**

**PEDRO HENRIQUE EDUARDO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA DA CIDADE DE FORMIGA/MG COM TRÊS CIDADES  
LOCALIZADAS EM PAÍSES REFERÊNCIAS: CHINA, JAPÃO E ALEMANHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 15 de junho de 2018.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. 01 – MSc. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega

---

Prof. 02 – Dr. Gustavo Lobato Campos

---

Prof. 03 – Dr. Ulysses Rondina Duarte

Formiga/MG, 15 de junho de 2018.

Dedico este trabalho à minha família, principalmente aos meus pais e irmão que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

## RESUMO

A população mundial vem passando por diversas modificações, em que se observam intensas discussões e incertezas sobre o futuro energético mundial. As transformações e os impactos ambientais têm impulsionado diversas pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias afim de viabilizar a utilização de fontes renováveis de energia. Considerada uma fonte de energia limpa, renovável e sustentável, a energia solar é vista como uma grande alternativa para a geração de eletricidade. Por esses e outros motivos é que a grande maioria dos países do mundo inteiro estão apostando cada vez mais no uso de energia solar, visando suprir as suas demandas energéticas com uma fonte limpa e renovável. Assim, neste trabalho é realizado um estudo comparativo da cidade de Formiga/MG com três cidades em países referências mundiais em capacidade de energia solar instalada, China, Japão e Alemanha, visando a compreensão do cenário atual. Dessa forma, desenvolveu-se quatro sistemas fotovoltaicos conectados à rede para as cidades selecionadas: Formiga (Brasil), Guiyang (China), Shimogou (Japão) e Göttingen (Alemanha). Após o estudo, pode-se concluir que a cidade mineira possui um potencial solar fotovoltaico superior as demais cidades (países), mesmo tendo o menor número de painéis fotovoltaicos dos sistemas analisados. De posse deste potencial fotovoltaico e com as devidas políticas de popularização desta modalidade de energia, a cidade mineira poderia produzir ainda mais energia renovável e limpa, acarretando assim em uma diminuição na dependência de energia de origem hidráulica.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Sistema Fotovoltaico. Energia Renovável. Geração de Energia Elétrica. Painel Solar.

## ABSTRACT

The world population has been facing several changes, in which there are intense discussions and uncertainties about the world energy future. The transformations and the environmental impacts have driven the researches for the development of new technologies of verbalization of the use of renewable sources of energy. Considered a source of clean, renewable, and sustainable energy, solar energy is seen as a great alternative to generation of electricity. So, for these and other reasons most countries around the world are utilizing the solar energy to supply your energy needs with a clean and renewable source. Thus, in this work a comparative study of the city of Formiga / MG with three cities in countries worldwide references in installed solar energy capacity, China, Japan and Germany, aiming at understanding the current scenario. Thus, four grid-connected photovoltaic systems were developed for the selected cities: Formiga (Brazil), Guiyang (China), Shimogou (Japan) and Göttingen (Germany). After the study, it can be concluded that the city of Minas Gerais has a solar photovoltaic potential superior to the other cities (countries), even though it has the least number of photovoltaic panels of the analyzed systems. With the possession of this photovoltaic potential and with the appropriate policies of popularization of this modality of energy, the city of Minas Gerais could produce even more renewable and clean energy, thus leading to a decrease in the dependence of energy of hydraulic origin.

**Keywords:** Solar Energy, Photovoltaic System. Renewable Energy. Electric Power Generation. Solar Panel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ranking mundial dos países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica, em 2017. ....	12
Figura 2 – Mapa do nível de radiação solar média global. ....	14
Figura 3 – Previsão do consumo de energia elétrica total no mundo até 2030, as diferentes cores representam fontes alternativas de geração de energia. ....	18
Figura 4 – Participação das fontes de energia renováveis na produção de eletricidade no mundo, final de 2016. ....	19
Figura 5 – Participação das fontes de energia no mundo até 2100. ....	20
Figura 6 – Sistema de aquecedor solar residencial. ....	21
Figura 7 – Ciclo combinado com o apoio de energia solar: sistema heliotérmico. ....	22
Figura 8 – Capacidade cumulativa em megawatts (MWp) agrupada por região, divulgada em 2016. ....	23
Figura 9 – Modelo de bandas dos três tipos de materiais: condutor, semicondutor e isolante. ....	25
Figura 10 – Lacuna em um semicondutor extrínseco tipo P. ....	26
Figura 11 – Elétrons livres em um semicondutor extrínseco tipo N. ....	26
Figura 12 – Esquema estrutural da célula fotovoltaica. ....	28
Figura 13 - Silício monocristalino. ....	29
Figura 14 - Silício policristalino. ....	29
Figura 15 - Silício amorfo. ....	30
Figura 16 - Representação esquemática da confecção do módulo fotovoltaico utilizando células fotovoltaicas. ....	31
Figura 17 - Representação esquemática de um módulo conectado em paralelo. ....	32
Figura 18 - Representação esquemática de um módulo conectado em série. ....	32
Figura 19 - Quadro comparativo entre os inversores autônomos (on-grid) e não autônomos (off-grid). ....	34
Figura 20 - Sistema fotovoltaico isolado – off-grid. ....	35
Figura 21 - Sistema fotovoltaico conectado à rede – on-grid. ....	36
Figura 22 - Sistema fotovoltaico híbrido. ....	37
Figura 23 - Radiação Solar Média Diária Anual. ....	39
Figura 24 – Usina Solar de Pirapora - MG. ....	40
Figura 25 - Irradiação solar da China. ....	42
Figura 26 - Capacidade de energia fotovoltaica instalada na China. ....	43
Figura 27- Parque solar Longyangxia Dam, China. ....	43
Figura 28 - Irradiação solar do Japão. ....	44
Figura 29 - Cidade inteligente de Fujisawa, Japão. ....	45
Figura 30 - Irradiação na Alemanha. ....	46
Figura 31 - Vilarejo de Schillierberg, Alemanha. ....	47
Figura 32 - Localização das cidades analisadas. ....	49
Figura 33 - Irradiação solar anual média das localidades selecionadas: (a) Formiga (Brasil); (b) Göttingen (Alemanha); (c) Guiyang (China) e (d) Shimogou (Japão). ....	60
Figura 34 - Comparação entre a irradiação solar mensal média de cada localidade. ....	61
Figura 35 - Temperatura média mensal das diferentes localidades. ....	62
Figura 36 - Energia anual gerada com perdas para cada localidade. ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas. ....	30
Tabela 2 - Coordenadas geográficas das cidades selecionadas. ....	50
Tabela 3 - Valores de temperatura média, irradiação solar mensal e diária de Formiga – Brasil e Göttingen – Alemanha. ....	50
Tabela 4 - Valores de temperatura média, irradiação solar mensal e diária de Guiyang – China e Shimogou – Japão. ....	51
Tabela 5 - Valores de irradiação solar média anual das cidades analisadas. ....	51
Tabela 6 - Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico escolhido. ....	53
Tabela 7 - Relação dos sistemas obtidos. ....	54
Tabela 8 - Relação dos sistemas obtidos. ....	54
Tabela 9 - Comparação das quantidades de energia gerada com perdas para as cidades em questão. .....	55
Tabela 10 - Parâmetros utilizados no dimensionamento do inversor. ....	58
Tabela 11 - Parâmetros dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede dimensionados da residência em questão para as diferentes localidades. ....	63
Tabela 12 - Custo do sistema, considerando módulos fotovoltaicos e inversor de frequência para cada localidade. ....	65



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivo Geral.....	15
1.3 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Estrutura do Trabalho .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Matriz Energética Mundial .....	18
2.2 Energia Solar .....	20
2.3 Energia Solar Fotovoltaica.....	22
2.3.1 Célula Fotovoltaica.....	24
2.3.2 Materiais Semicondutores.....	25
2.3.3 Efeito Fotovoltaico.....	27
2.3.4 Módulo Fotovoltaico .....	31
2.3.5 Inversores de Frequência.....	33
2.3.6 Sistemas Fotovoltaicos .....	34
2.4 Potencial Energético de Minas Gerais .....	37
2.4.1 Usina Solar de Pirapora .....	40
2.5 Potencial Solar dos Países Referências Mundiais em Produção de Energia Solar Fotovoltaica .....	41
2.5.1 China.....	41
2.5.2 Japão .....	44
2.5.3 Alemanha .....	46
3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA .....	49
3.1 Projeto do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede .....	49
3.2 Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos.....	51
3.3 Dimensionamento do Inversor .....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	60
4.1. Irradiação Solar Anual Média e Temperatura média das Localidades Selecionadas .....	60
4.2. Estudo Comparativo dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Dimensionados .....	63
4.3. Custo dos Sistemas Fotovoltaicos Dimensionados .....	65
5 CONCLUSÕES .....	67
5.1. Trabalhos Futuros.....	68

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
----------------------------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é vista como uma opção promissora na busca por uma participação cada vez mais relevante de fontes renováveis na matriz energética mundial. Essa fonte de energia consiste na conversão direta da radiação solar em energia elétrica e é uma das fontes cujo uso mais cresce em todo o mundo (PERLOTTI *et al.*, 2012) (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A produção de energia por meio do aproveitamento da energia solar em sistemas fotovoltaicos pode ser feita de três formas distintas, denominadas: geração centralizada, geração isolada e geração distribuída (ROSA, 2016).

A geração centralizada é caracterizada pela produção de energia elétrica em larga escala, a qual é disponibilizada no sistema elétrico por meio de linhas de transmissão. As outras duas formas de geração são caracterizadas pela produção de energia em pequena escala, porém se diferem em outros pontos. A geração isolada consiste na produção local de energia elétrica e é utilizada em regiões remotas, onde o sistema elétrico não alcança. A geração distribuída consiste na produção de energia elétrica por um sistema conectado à rede pública de distribuição, junto à unidade consumidora, o que permite que a energia gerada em excedente possa ser injetada na rede, gerando, assim, créditos energéticos para os consumidores (RODRIGUES, 2016) (ROSA, 2016).

Segundo ABSOLAR (2016), a utilização da energia solar fotovoltaica como fonte de geração de energia elétrica oferece diversos benefícios, tanto no âmbito elétrico, quanto ambiental e socioeconômico. Sob o aspecto elétrico, contribui para a diversificação da matriz energética e para o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia. Do ponto de vista ambiental, colabora para a redução da emissão de gases de efeito estufa. No âmbito socioeconômico, a geração de energia solar fotovoltaica possibilita a geração de empregos locais.

Dessa forma, em decorrência dos benefícios proporcionados pelo uso da fonte solar juntamente com as políticas de incentivo, a capacidade mundial de geração de energia solar fotovoltaica vem crescendo de forma exponencial nos últimos anos. No ano de 2017, foram instalados no mundo aproximadamente 305 GW de capacidade de geração, o que equivale a um aumento de 33% em relação a capacidade instalada em 2016 (ABSOLAR, 2017).

Os 10 países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica do mundo, no ano de 2017, listados pela *International Energy Agency* (IEA), são apresentados na Figura 1 (ABSOLAR, 2017).

1		China	78,1 GW
2		Japan	42,8 GW
3		Germany	41,2 GW
4		USA	40,3 GW
5		Italy	19,3 GW
6		UK	11,6 GW
7		India	9 GW
8		France	7,1 GW
9		Australia	5,9 GW
10		Spain	5,5 GW

Figura 1 – Ranking mundial dos países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica, em 2017.

Fonte: (ABSOLAR, 2017).

Esses países têm em comum uma constante preocupação com a estruturação de políticas que incentivem o aumento da participação da fonte solar em suas matrizes elétricas. Uma das formas de incentivo, atuante em mais de 50 países, é a chamada Tarifa Prêmio, a qual consiste no pagamento de um preço mais elevado por cada MWh produzido pela geração fotovoltaica (PERLOTTI *et al.*, 2012).

No Brasil, também houveram alguns avanços recentes em relação às políticas de incentivo à energia solar fotovoltaica, destacando-se: o Convênio ICMS Nº 16/2015; a isenção de PIS/Pasep e da COFINS; a atualização da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL para a Resolução Normativa 687/2015; e o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) (RODRIGUES, 2016).

Acredita-se que os obstáculos existentes no Brasil em relação à energia solar fotovoltaica estão sendo superados, ainda que lentamente, o que é evidenciado pela evolução do setor nos últimos anos. Ao final de março de 2018, o Brasil apresentava 1,356 GW de capacidade instalada de geração fotovoltaica, sendo 1,13 GW de geração centralizada e 0,226 GW de geração distribuída (ROSA, 2016) (MME, 2018).

Entretanto, mesmo com esses avanços, ainda há muito o que progredir para que o Brasil consiga ocupar um lugar de destaque no cenário mundial da energia solar,

principalmente em relação a incentivos fiscais, pesquisas e conscientização da população sobre os benefícios dessa fonte de energia (NASCIMENTO, 2017).

Assim sendo, o presente trabalho visa comparar o potencial solar fotovoltaico de Formiga/MG com três cidades em países líderes em capacidade de geração fotovoltaica instalada. De acordo com a Figura 1, pode-se visualizar que a China (1º Lugar) é o país que possui maior capacidade de geração fotovoltaica, seguida por Japão (2º Lugar) e Alemanha (3º Lugar). Após a comparação, pode-se verificar que a cidade de Formiga/MG apresenta um potencial fotovoltaico superior as demais cidades analisadas, indicando assim, um cenário ideal para o desenvolvimento da geração fotovoltaica, desde que sejam utilizadas políticas e incentivos fiscais visando a popularização deste tipo de energia renovável.

Na próxima seção tem-se a apresentação da justificativa de escolha do tema deste trabalho de conclusão de curso.

## **1.1 Justificativa**

O Brasil possui grande potencial para geração de energia elétrica a partir de fonte solar, apresentando níveis de radiação superiores aos de países onde o uso deste tipo de energia já se encontra amplamente difundido. A última edição publicada do Atlas Brasileiro de Energia Solar, por exemplo, destaca o alto índice e a baixa variabilidade de radiação solar do país em comparação com países onde a tecnologia fotovoltaica já está bem consolidada, como: Alemanha, China, Japão, Itália, França e Espanha (INPE, 2017) (NASCIMENTO, 2017).

Segundo essa edição do Atlas, o local menos ensolarado do Brasil é capaz de produzir mais energia elétrica por meio de fonte solar do que o local mais ensolarado da Alemanha; fato este que evidencia a expressiva diferença entre os potenciais fotovoltaicos desses países (INPE, 2017) (NASCIMENTO, 2017). Os níveis de radiação solar desses países e de todos os outros do mundo são apresentados na Figura 2.

Além dos altos índices de radiação solar no Brasil, evidenciados por meio da Figura 2, o país possui ainda uma extensa área degradada ou de baixo valor econômico, o que também favorece a implantação de projetos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar (INPE, 2017).

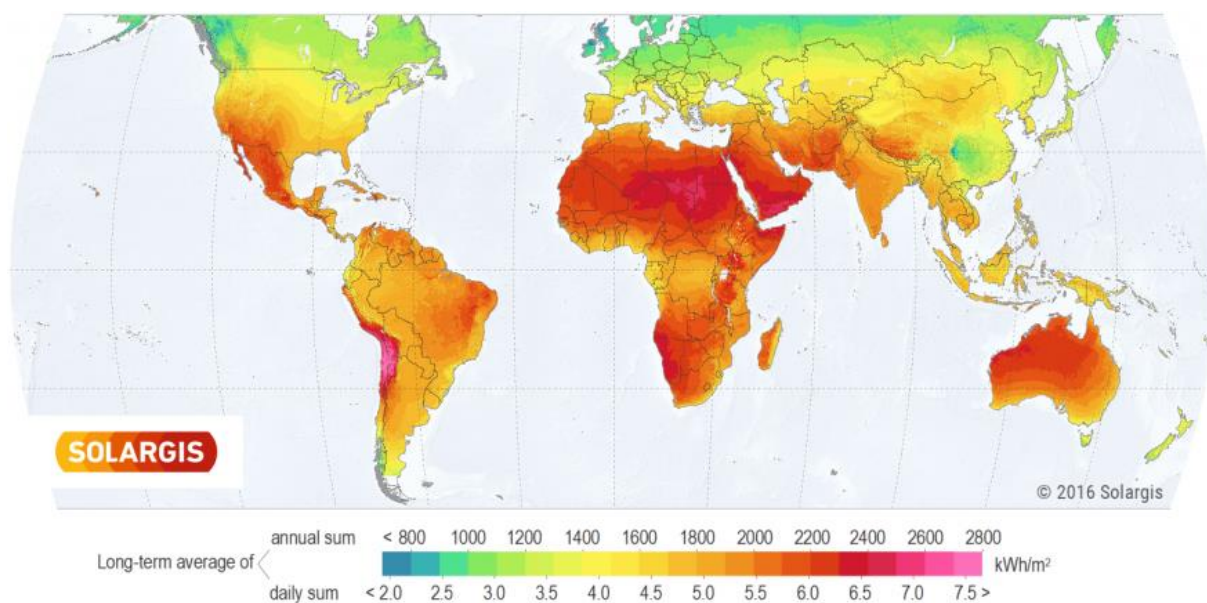


Figura 2 – Mapa do nível de radiação solar média global.

Fonte: (NORDEN SOLAR, 2016).

Entretanto, apesar das condições favoráveis para o seu desenvolvimento, a energia solar fotovoltaica ainda é pouco explorada no Brasil. Isso pode ser explicado pelo fato dos incentivos do governo à inserção da fonte solar na matriz elétrica brasileira não serem ainda tão significativos se comparados aos países cujo uso da tecnologia fotovoltaica já está bem desenvolvido; nesses países as políticas de incentivo são fortemente apoiadas pelos seus governos (PERLOTTI *et al.*, 2012) (NASCIMENTO, 2017).

Contudo, é importante ressaltar que, ao contrário dos países líderes em produção mundial, de matriz elétrica baseada principalmente em combustíveis fósseis, a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, com forte presença de hidrelétricas. Isso possivelmente explica a presença de poucas políticas de incentivo à fonte solar no Brasil em comparação com esses países, tendo em vista que o apelo ambiental se torna menos atrativo na discussão do planejamento elétrico do Brasil (PERLOTTI *et al.*, 2012) (NASCIMENTO, 2017).

Porém, em contradição, outra justificativa plausível para o incentivo ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no Brasil, além das condições favoráveis presentes no país, é justamente o fato da matriz elétrica brasileira ser altamente dependente das fontes hidráulicas (MELO, 2016).

Essa dependência torna o setor elétrico brasileiro bastante vulnerável diante de uma escassez de recursos hídricos. No ano de 2017, por exemplo, houve uma expressiva redução do volume de chuvas no Brasil, o que levou o governo a optar pelo acionamento das usinas térmicas, a fim de suprir a demanda de energia elétrica do país. A energia proveniente das termelétricas é uma energia mais poluente e com um custo de produção maior em relação às hidrelétricas, o que traz consequências diretas tanto para o ambiente quanto para os consumidores (MELO, 2016) (G1, 2017).

Outro problema inerente ao uso das usinas hidrelétricas é o fato das grandes usinas encontrarem-se afastadas dos maiores centros urbanos, o que resulta em altos investimentos com transmissão e distribuição de energia elétrica. Além disso, devido à grande extensão do território brasileiro, o sistema convencional de distribuição, muitas vezes, não consegue atender a todos os locais com eficiência, confiabilidade e custo acessível (ROSA, 2016) (INPE, 2017).

Nesse sentido, o uso da energia solar fotovoltaica pode contribuir de forma relevante para a diversificação da matriz elétrica brasileira, auxiliando na preservação das fontes tradicionais de energia, seja pela economia de combustíveis fósseis ou pela conservação do nível dos reservatórios das hidrelétricas. Assim, tem-se um cenário favorável para o desenvolvimento de estudos e pesquisas que estimulem a evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil, incluindo o estudo desenvolvido nesta monografia de conclusão de curso.

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta monografia é comparar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica da cidade de Formiga/MG, com três cidades em países líderes de produção fotovoltaica: Guiyang (China), Shimogou (Japão) e Göttingen (Alemanha). Os parâmetros utilizados para a comparação foram: irradiação solar, temperatura média para o dimensionamento do inversor, quantidade de painéis, energia produzida em cada sistema fotovoltaico e o custo de cada sistema.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Para consolidar o objetivo geral, alguns objetivos específicos devem ser alcançados, tais como:



- Realizar uma revisão bibliográfica sobre aspectos relacionados à energia solar fotovoltaica e aos sistemas fotovoltaicos;
- Tomar conhecimento sobre o estado da arte da matriz energética mundial, bem como do potencial solar fotovoltaico de Minas Gerais e de alguns países cujo uso dessa energia já está mais desenvolvido;
- Escolher as cidades em três países com o maior potencial de geração fotovoltaico: Guiyang (China), Shimogou (Japão) e Göttingen (Alemanha), que serão comparadas com a cidade de Formiga/MG;
- Fazer um levantamento do índice médio diário de radiação solar de Formiga/MG e das cidades escolhidas para comparação;
- Realizar um levantamento do perfil de consumo de energia elétrica de uma residência de classe média no Brasil;
- Fazer o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos de Formiga, Guiyang Shimogou e Göttingen, baseado em um perfil de uma residência de consumo médio;
- Realizar um estudo comparativo do potencial solar fotovoltaico de Formiga/MG com os potenciais das cidades em análise. Considerando os parâmetros: irradiação solar, temperatura média para o dimensionamento do inversor, quantidade de painéis, energia produzida em cada sistema fotovoltaico e o custo de cada sistema.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho é estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução do tema tratado nesta monografia, contextualizando-o com a problemática do trabalho e seus objetivos. O Capítulo 2 abrange itens essenciais para uma melhor compreensão do desenvolvimento deste trabalho, como informações gerais sobre a matriz energética mundial, conceitos da energia solar fotovoltaica, classificações dos sistemas fotovoltaicos, bem como os potenciais energéticos das cidades em questão. O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada na realização deste trabalho, contendo detalhes sobre os cálculos e procedimentos utilizados. Os resultados do estudo comparativo do potencial solar fotovoltaico de Formiga/MG e das demais cidades são descritos e discutidos no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são



apresentadas as considerações finais da monografia e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido, como conceitos envolvendo a matriz energética mundial, energia solar fotovoltaica, potencial energético do estado de Minas Gerais e dos países, China, Japão e Alemanha.

### 2.1 Matriz Energética Mundial

Dentre as diversas formas de energia no mundo, a energia elétrica, também conhecida por eletricidade, é a forma de energia mais flexível que existe, visto que, ela pode ser transmitida a longas distâncias, desde sua geração até o local de consumo, podendo ser convertida em calor, movimento, luz e informação (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

O ser humano, sobretudo no mundo moderno, é altamente dependente da energia elétrica, uma vez que praticamente todas as atividades e manutenção de seus polos industriais é necessário a utilização direta ou indireta da eletricidade. Mas esse conforto tem um custo cada vez mais elevado para o planeta, pois o maior percentual de energia gerada no mundo é proveniente de fontes não renováveis de energia, isto é, fontes que podem se esgotar em um determinado futuro (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

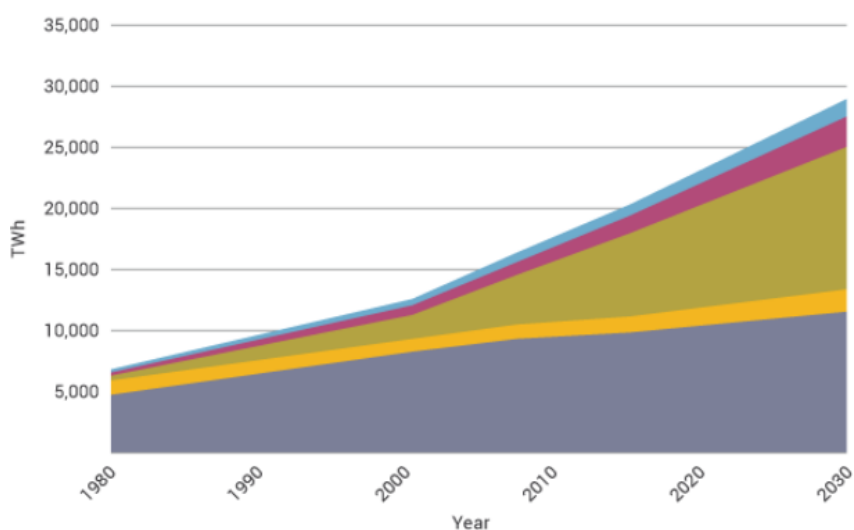


Figura 3 – Previsão do consumo de energia elétrica total no mundo até 2030, as diferentes cores representam fontes alternativas de geração de energia.

Fonte: Figura extraída de (IEA WORLD *Energy Outlook*, 2016).

A Figura 3 apresenta o crescimento do consumo de energia elétrica no mundo desde 1980, mostrando também uma previsão de como será esse consumo até o ano de 2030. Embora seja uma previsão, é certo que o mundo precisa de uma quantidade consideravelmente alta de energia elétrica para sustentar sua demanda atual e para suprir seu consumo futuro (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Para atender a quantidade de energia prevista que será consumida em 2030, serão necessárias em torno de 230 usinas hidrelétricas, com as mesmas capacidades de geração de Itaipu ou até mil usinas nucleares iguais a de Fukushima, no Japão, cuja demanda prevista podem chegar ou ultrapassar trinta mil terawatts-hora.

É notável que o mundo necessita de uma grande produção de eletricidade, essa que, pode ser gerada de diversas formas, graças à sua flexibilidade. Atualmente, grande parte da energia elétrica produzida em todo o planeta é proveniente da queima de combustíveis fósseis e da energia nuclear e uma pequena parcela desta produção, tem origem em fontes renováveis de energia (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Como pode ser visto na Figura 4, no final do ano de 2016, as fontes não-renováveis de energia representaram 76,3% da produção de energia elétrica mundial, enquanto as energias renováveis, são responsáveis por apenas 23,7%.

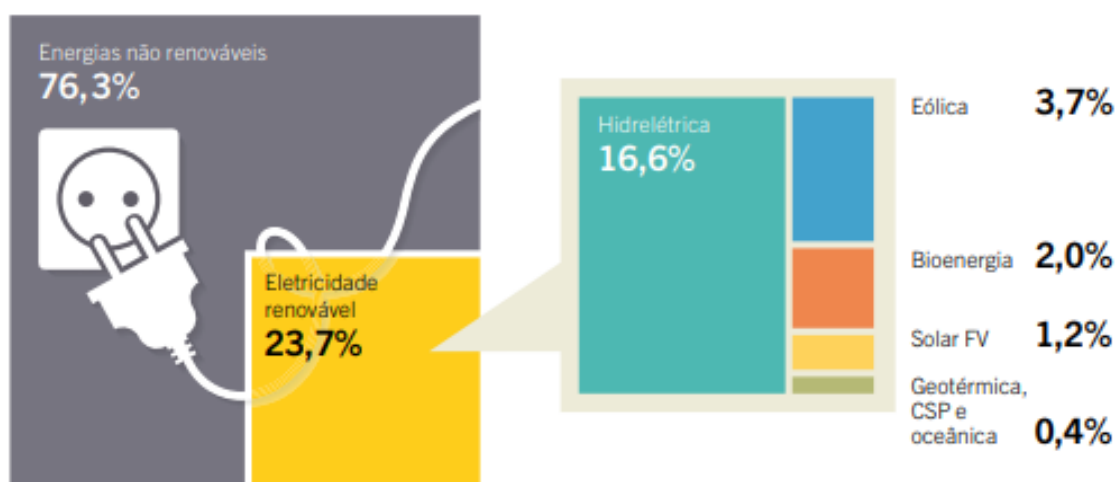


Figura 4 – Participação das fontes de energia renováveis na produção de eletricidade no mundo, final de 2016.

Fonte: Figura extraída de (Ren21, 2016).

Com isso, sabendo que os recursos irão se esgotar um dia, e que a queima de combustíveis fósseis prejudica a atmosfera, contribuindo para o aumento do efeito estufa, as fontes renováveis de energia são vistas como alternativas para suprirem a

demanda de energia elétrica mundial (VILLALVA; GAZOLI, 2013). O gráfico apresentado na Figura 5 ilustra uma previsão da participação das diversas fontes de energia disponíveis no mundo até o ano de 2100. Pode-se verificar que a participação das energias não-renováveis será cada vez menor, ao passo que as energias renováveis representarão a maior parte da composição energética mundial, e as principais fontes de energia serão a energia solar fotovoltaica, térmica e eólica (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

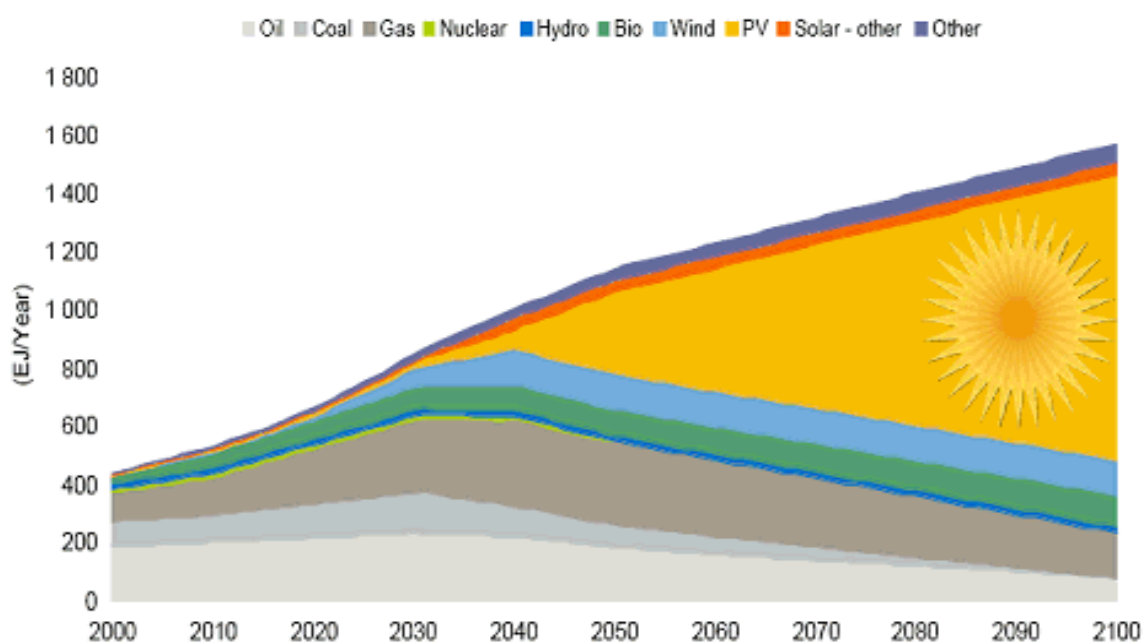


Figura 5 – Participação das fontes de energia no mundo até 2100.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.solarwirtschaft.de>).

## 2.2 Energia Solar

Diante de preocupações ambientais e mudanças climáticas causadas principalmente pela emissão de combustíveis fósseis e um possível esgotamento de suas reservas no planeta, a importância e utilização das energias alternativas renováveis passou a ganhar mais destaque.

Por se tratar de uma energia limpa, com mínimo impacto ambiental, ser abundante e ilimitada, a energia solar vem se destacando entre as diversas energias alternativas disponíveis no planeta e é vista como grande potencial na composição da matriz energética mundial.

A energia que provém da luz e calor do Sol, a qual, se propaga, sobre forma de onda eletromagnética (radiação solar), em um espaço interplanetário é denominada Energia Solar (MARTINS, 2016).

A radiação solar anual incidente sobre a atmosfera, é estimada em  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia, isto corresponde a 1000 vezes o consumo mundial de energia, num mesmo período. Porém, somente parte dessa radiação atinge a superfície terrestre, devido a absorção dos raios solares pela atmosfera (CRESESB, 2008).

A energia solar vem sendo aproveitada por diversos dispositivos tecnológicos que se encontram em constante evolução. Basicamente, ela pode ser aproveitada de duas formas principais: energia solar térmica e energia solar fotovoltaica (ECYCLE, 2016). A primeira, consiste no aproveitamento da radiação solar sob forma de calor para aquecimento, ou para a produção de eletricidade. Comumente, o calor é captado por coletores solares que são instalados nos telhados de prédios ou residências para aquecer a água, armazenada em um reservatório, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6 – Sistema de aquecedor solar residencial.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.portalenergiasolar.com.br>).

O calor do Sol também pode ser utilizado com a finalidade de gerar energia elétrica. Isso só é possível com as usinas térmicas, que concentram e captam o calor para o aquecimento de um determinado fluido. O funcionamento é semelhante ao usado em sistemas de aquecimento solar. Através do fluido, o calor é transportado até uma central geradora, onde é produzido vapor que aciona uma turbina acoplada

à um gerador elétrico, como ilustrada na Figura 7 (VILLALVA; GAZOLI, 2013) (PORTAL SOLAR, 2016).

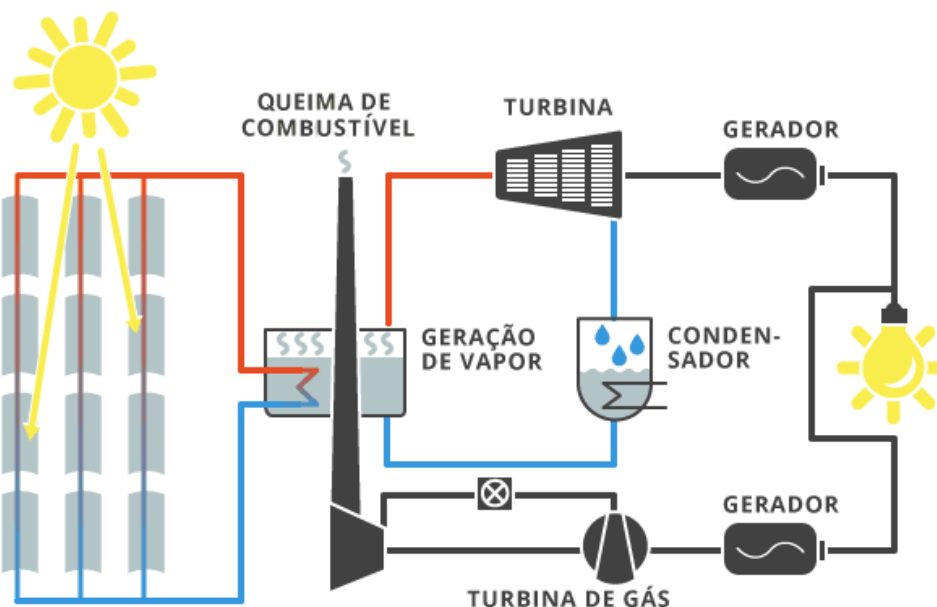


Figura 7 – Ciclo combinado com o apoio de energia solar: sistema heliotérmico.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.portalenergiasolar.com.br>).

Já a energia solar fotovoltaica, tipo de energia discutido neste trabalho, baseia-se na conversão direta da radiação solar em energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico. Mesmo diante de algumas dificuldades que retardam seu crescimento, como alto custos, baixos rendimentos, dependências das condições atmosféricas, armazenamento pouco eficiente quando comparado a outras fontes de energia, entre outros fatores, de acordo com um estudo realizado pelo Conselho Mundial da Energia, publicado em 2016 (WORLD ENERGY COUNCIL - WEC, 2016), mostra que, em 2100, 70% da energia consumida será de origem solar, conforme já antecipado pela Figura 5.

### 2.3 Energia Solar Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos, diferentemente dos sistemas solares térmicos que são utilizados para realizar o aquecimento ou a produção de energia elétrica a partir da energia térmica, tem a capacidade de produzir corrente elétrica, através da captação direta da luz solar. Essa corrente, que é coletada por dispositivos

conversores e controladores, pode ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

De acordo com a Figura 8, em todo o mundo, a energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia cujo uso apresenta maior crescimento. A previsão é de que a quantidade de energia solar fotovoltaica instalada no final de 2017, deva atingir um total de 401,5 mil GW (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA, 2016).

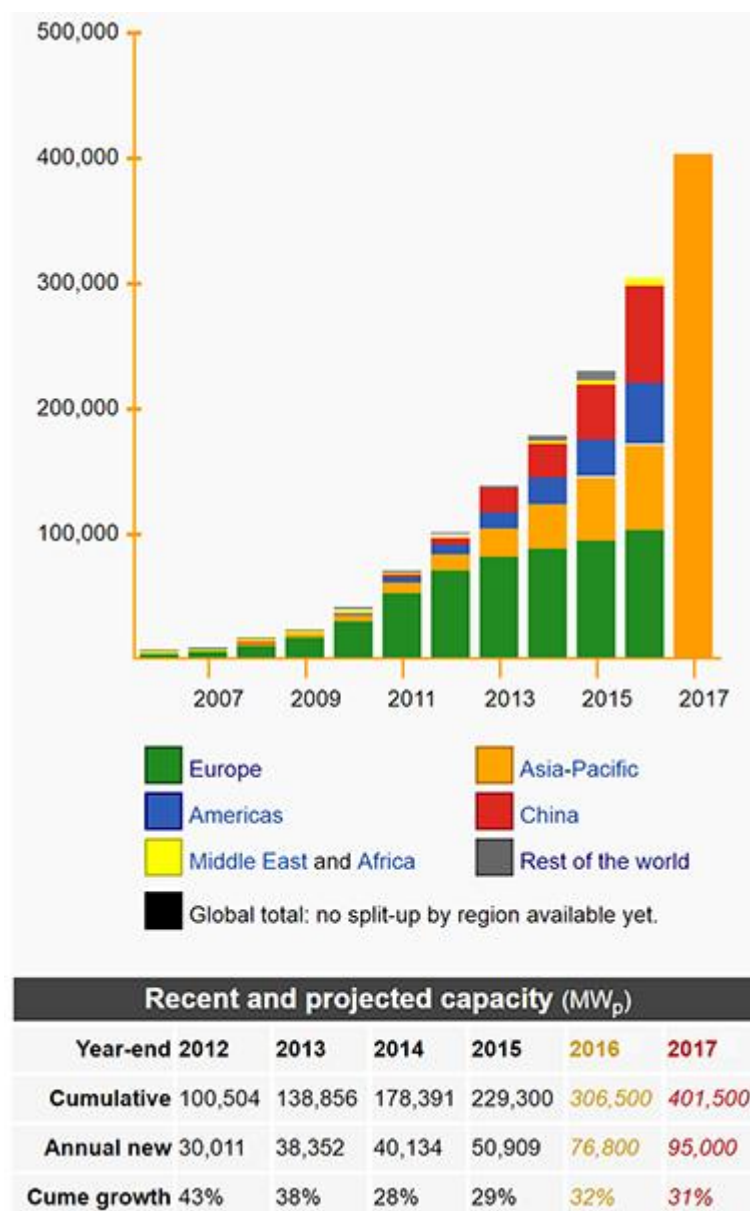


Figura 8 – Capacidade cumulativa em megawatts (MWp) agrupada por região, divulgada em 2016.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.iea.org>).

Países como China, Estados Unidos e Índia apresentaram um massivo crescimento na capacidade de geração, enquanto a Europa, que nos últimos anos,

apresentou um crescimento exponencial, teve um aumento modesto no ano de 2017, devido a mudanças nos incentivos governamentais. O Brasil, mesmo possuindo uma localização geográfica privilegiada, não figura nos países com maior produção de energia elétrica, tendo o Sol como sua principal fonte (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA, 2016).

China, Japão e Alemanha são os países com maior potência fotovoltaica instalada. O grupo corresponde a aproximadamente 60% do total mundial nessa fonte (ABSOLAR, 2017).

A crescente ascensão da energia fotovoltaica pode ser explicada pelas diversas vantagens que esse tipo de fonte de energia fornece, tais como: (PORTAL SOLAR, 2016):

- Facilidade de instalação;
- Pouco impacto ambiental;
- Não emite poluição sonora durante o processo de conversão de energia;
- Poucas manutenções durante a vida útil do sistema;
- Por ser instalada em áreas isoladas da rede convencional de energia elétrica;
- Alto suficiente e renovável;
- Retorno do investimento, mesmo que, a longo prazo.

Embora seja uma fonte de energia em evolução e com grande potencial energético, esse sistema apresenta algumas desvantagens que retardam seu crescimento, dentre elas destacam-se o alto custo de instalações e a não geração de eletricidade na falta da luz do sol. Para uma melhor compreensão de como é realizado a conversão da radiação solar em energia elétrica, é necessário o entendimento de alguns tópicos que serão apresentados na próxima subseção.

### **2.3.1 Célula Fotovoltaica**

O elemento básico de um sistema fotovoltaico é a célula, pois é nela que, diante do efeito fotovoltaico, realiza a conversão da energia radiante em eletricidade.

Os principais componentes das células fotovoltaicas são os materiais semicondutores, e para que se compreenda o funcionamento destas é fundamental saber como se comportam e o que são os materiais semicondutores. Nas próximas



subseções, são apresentadas algumas características destes materiais, e posteriormente o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

### 2.3.2 Materiais Semicondutores

Em linhas gerais, são encontrados na natureza três tipos de materiais quanto ao comportamento de condutividade elétrica: condutores, isolantes e semicondutores. Os materiais condutores possuem uma predisposição para a condução de corrente elétrica, os isolantes, possui a característica de não conduzir a corrente elétrica, e por fim, os semicondutores, que são aqueles materiais que podem se comportar tanto como condutor ou isolante (UNICAMP, 2017). A diferença entre os três tipos de materiais é exemplificada pelo modelo de bandas de energia, conforme ilustrado na Figura 9.

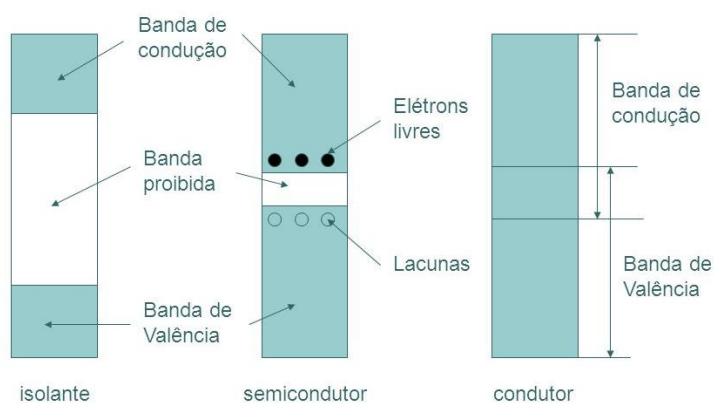


Figura 9 – Modelo de bandas dos três tipos de materiais: condutor, semicondutor e isolante.

Fonte: Figura extraída de (IFSC, 2016).

Analisando a Figura 9, verifica-se que os materiais apresentam diferentes tamanhos de *gap* de energia (distância entre a banda de valência e a banda de condução), o que faz com que o material tenha ou não uma predisposição para a condução de corrente elétrica, uma vez que, quanto maior o *gap*, maior a dificuldade da condução. Como o *gap* dos semicondutores é menor que a do material isolante, a quantidade de energia necessária para que os elétrons que estão na banda de valência consigam superar o *gap* e ir para a banda de condução é menor. Um processo chamado de dopagem é utilizado para ajudar na condução e garantir mais eficiência ao processo (UNICAMP, 2017).

A dopagem, em um cristal semiconductor, é um processo químico no qual são introduzidos elementos adicionais conhecido por impurezas, que possuem três ou cinco elétrons de valência, na estrutura cristalina da substância a ser dopada alterando suas propriedades elétricas (SEED, 2017). Realizada a dopagem, o semiconductor é denominado semiconductor extrínseco, ou seja, acrescido de impurezas, podendo ser um material do tipo P (com excesso de lacunas) ou do tipo N (com excesso de elétrons), dependendo do elemento ou impureza adicionada.

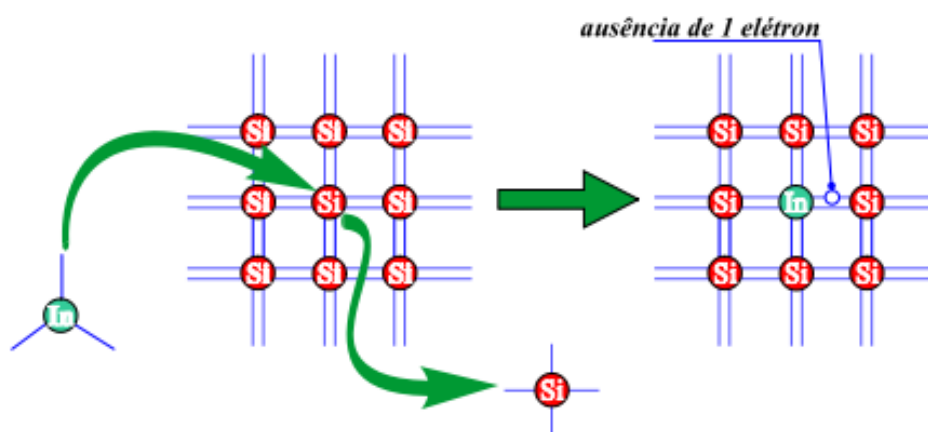


Figura 10 – Lacuna em um semiconductor extrínseco tipo P.

Fonte: Figura extraída de (<http://eletronicasemlimites.blogspot.com>).

Um material tipo P, pode ser obtido dopando o semiconductor com um elemento que possua três elétrons de valência (Alumínio, Índio, Boro ou Gálio). Este material possui excesso de lacunas, que é a falta de um elétron na ligação individual (covalente) de um átomo do semiconductor com um átomo da impureza, conforme Figura 10.

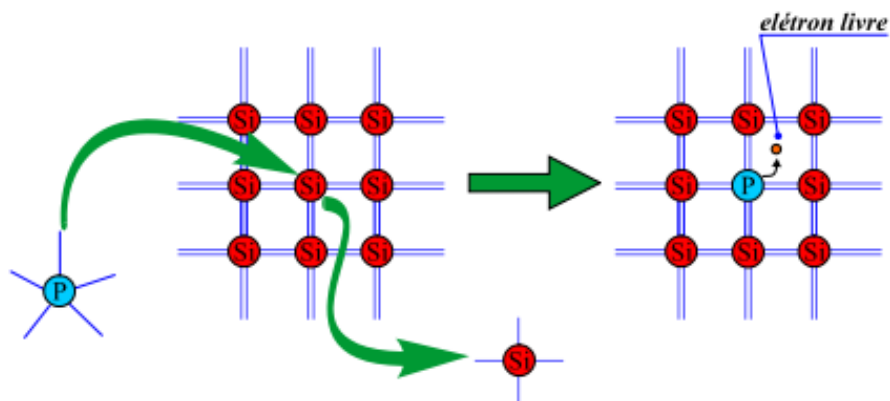


Figura 11 – Elétrons livres em um semiconductor extrínseco tipo N.

Fonte: Figura extraída de (<http://eletronicasemlimites.blogspot.com>).

Para obter um material tipo N, deve-se dopar o material semiconductor com um elemento que possua cinco elétrons de valência (Antimônio, Fósforo ou Arsênio). Este material, diferentemente do tipo P, possui excesso de elétrons livres, pois como o material tende a se estabilizar com oito elétrons de valência, realiza quatro ligações covalente, ou seja, elétrons que sobram nas ligações individuais (covalentes) dos átomos do semiconductor com os átomos da impureza (UNICAMP, 2017). A Figura 11 ilustra os elétrons livres em um material semiconductor.

### **2.3.3 Efeito Fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que se baseia na transformação da luz solar em eletricidade quando a mesma é incidida nas células fotovoltaicas, sendo estas compostas por materiais semicondutores. (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Para que ocorra o efeito fotovoltaico é necessário unir dois tipos de semicondutores, tipo P e tipo N, formando assim uma junção P-N. Quando os materiais são unidos, na interface é criado um campo elétrico devido os elétrons livres do silício tipo N que ocupam as lacunas do tipo P. Com a incidência da luz na célula fotovoltaica, os fótons colidem com os elétrons da estrutura fornecendo energia a eles e transformando-os em condutores. Os elétrons são orientados por consequência do campo elétrico formado na junção P-N e fluem da camada P para a cada N.

Com o auxílio de um condutor externo, conectando a camada positiva à negativa, forma-se um fluxo de elétrons, corrente elétrica, que é mantido enquanto a luz estiver incidindo sobre a célula, cujo valor será diretamente proporcional a intensidade de luz incidente sobre a célula fotovoltaica. Esse processo é denominado de efeito fotovoltaico (ARAÚJO, 2004) (CRESESB, 2008). A fim de evitar a reflexão na célula fotovoltaica e aumentar a absorção de luz pela célula, uma camada de material antirreflexo, comumente feita de nitreto de silício ou de dióxido de titânio é utilizada (VILLALVA, 2013). O esquema estrutural da célula fotovoltaica pode ser visualizado na Figura 12.

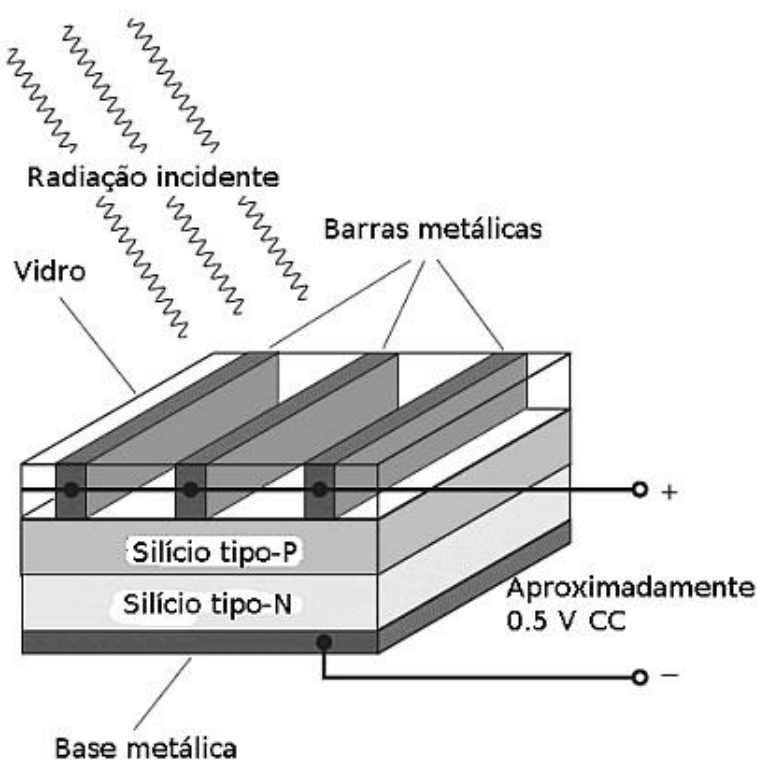


Figura 12 – Esquema estrutural da célula fotovoltaica.

Fonte: Figura extraída de (ARAUJO, 2004).

Ressaltando que, uma célula fotovoltaica não consegue armazenar a energia elétrica, ela é apenas responsável por manter o fluxo de elétrons enquanto houver incidência de luz sobre ela (ARAUJO, 2004).

Atualmente, o semicondutor mais utilizado na composição das células fotovoltaicas no mundo, representando aproximadamente 95% da fabricação, é o Silício. Outros materiais como o  $\text{CuInSe}_2$  (disseleneto de cobre-índio),  $\text{CdTe}$  (telureto de cádmio),  $\text{GaAs}$  (arseneto de gálio), células foto-eletroquímicas  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titânio) também podem ser utilizados, porém até o momento, são usados em escala reduzida ou experimental (CRESESB, 2017).

O silício monocristalino, apresentado na Figura 13, é o material mais empregado na fabricação das células fotovoltaicas, embora apresente alto custo de fabricação, pois a utilização de um cristal único que resulta na uniformidade de sua estrutura molecular potencializa o efeito fotovoltaico. O rendimento atingido em laboratório é de aproximadamente 24%, enquanto, seu rendimento em situações do dia a dia atinge aproximadamente 15% (CASTRO, 2002).



Figura 13 - Silício monocristalino.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.sun7energiasolar.com.br>).

O silício policristalino, apresentado na Figura 14, possui descontinuidade de sua estrutura molecular e dificulta o movimento dos elétrons encorajando a recombinação com as lacunas, reduzindo a potência de saída, fazendo com que, seus rendimentos laboratoriais e em utilização prática não ultrapassem 18% e 12%, respectivamente (CASTRO, 2002).



Figura 14 - Silício policristalino.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.ecycle.com.br>).

Por não possuir uma estrutura cristalina, o silício amorfo, apresentado na Figura 15, apresenta defeitos estruturais que impediriam sua utilização em células fotovoltaicas, mas ao se aplicar o processo de hidrogenização, ou seja, adicionar uma quantidade mínima de hidrogênio, os átomos de hidrogênio combinam-se quimicamente minimizando os efeitos negativos dos defeitos estruturais. É possível

obter rendimentos de aproximadamente 13% em laboratórios, porém, em utilização prática, seu rendimento não ultrapassa 6% (CASTRO, 2002).



Figura 15 - Silício amorfo.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.instalacionesyeficienciaenergetica.com>).

Existem diversos outros materiais disponíveis no mercado que podem ser utilizados na fabricação de células fotovoltaicas e novas tecnologias que influenciam diretamente na eficiência da conversão da energia solar em eletricidade (VILLALVA, 2013). A Tabela 1 faz um comparativo entre algumas tecnologias fotovoltaicas existentes. As células e os módulos que apresentam maiores eficiência de conversão, tanto em testes laboratoriais quanto em utilização prática são as de silício mono e policristalino, com a exceção das células híbridas.

Tabela 1 – Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.

<b>Material da célula fotovoltaica</b>	<b>Eficiência da célula em laboratório (%)</b>	<b>Eficiência da célula comercial (%)</b>	<b>Eficiência dos módulos comerciais (%)</b>
Silício monocristalino	24,7	18	14
Silício policristalino	19,8	15	13
Silício cristalino de filme fino	19,2	9,5	7,5
Silício amorfo	13	10,5	7,5
Silício micromorfo	12	10,7	9,1
Célula solar híbrida	20,1	17,3	15,2
CIS, CIGS	18,8	14	10
Telureto de cádmio	16,4	10	9

Fonte: (FERREIRA, 2016).



### 2.3.4 Módulo Fotovoltaico

A unidade básica de todo sistema fotovoltaico é o módulo, também conhecido por painel ou placa. O módulo é composto por diversas células fotovoltaicas conectadas eletricamente e montados sobre uma estrutura rígida fornecendo corrente e tensão suficientes para a utilização, conforme pode ser visualizado na Figura 16. Esse conjunto é indispensável, pois apenas uma célula fotovoltaica fornece uma tensão de aproximadamente 0,4 V no ponto de máxima potência. Devido a espessura reduzida da célula fotovoltaica, é necessário realizar esforço mecânico e de proteção de fatores ambientais para a composição do módulo fotovoltaico (CRESESB, 2004) (VILLALVA, 2013).

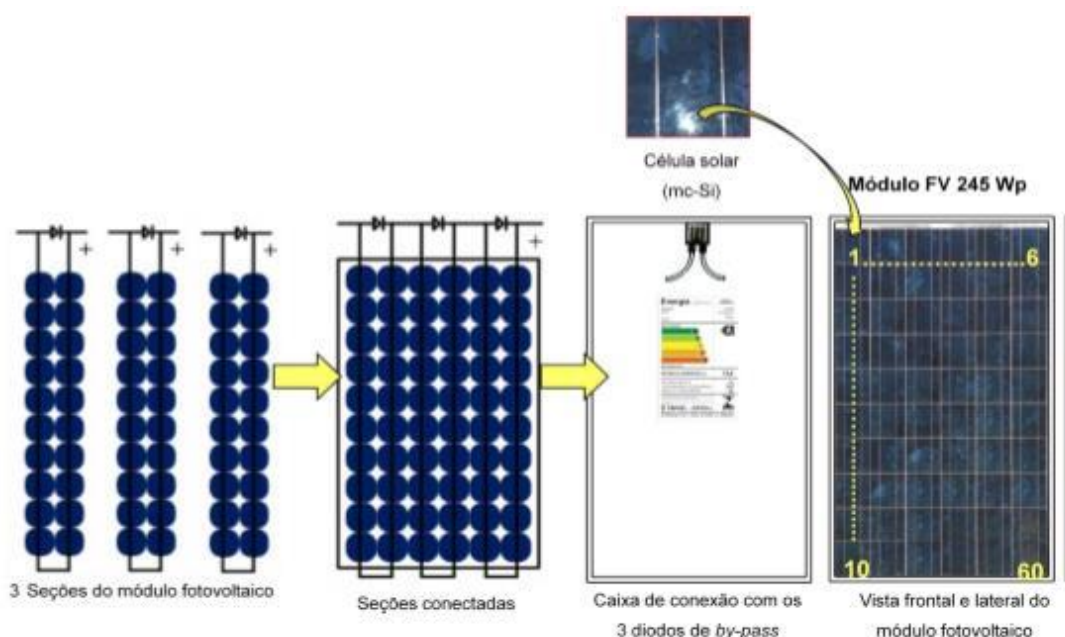


Figura 16 - Representação esquemática da confecção do módulo fotovoltaico utilizando células fotovoltaicas.

Fonte: Figura extraída de (RESEARCHGATE, 2016).

Dependendo da corrente elétrica e da tensão de utilização desejada, as células podem se conectar em série e/ou paralelo. Quando conectados em paralelo, conforme a Figura 17, a tensão de saída é equivalente à tensão de cada módulo individual e a corrente elétrica é a soma das correntes dos módulos do conjunto.

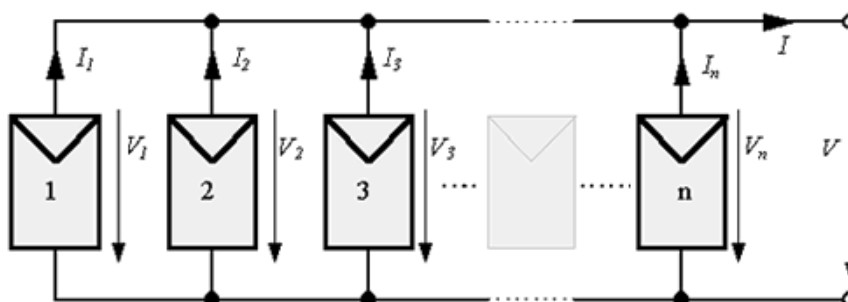


Figura 17 - Representação esquemática de um módulo conectado em paralelo.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.cresesb.cepel.br>).

Já na conexão em série, conforme a Figura 18, a corrente elétrica que circula no sistema é a mesma em todos os módulos e a tensão de saída é a soma das tensões individuais de cada módulo.

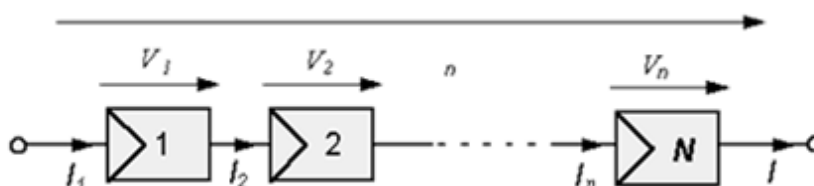


Figura 18 - Representação esquemática de um módulo conectado em série.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.cresesb.cepel.br>).

Além das células fotovoltaicas, os módulos contêm também diodos *by-pass* e de bloqueio. Os primeiros são responsáveis por garantir um caminho alternativo para a corrente elétrica, caso alguma célula apresente um pior desempenho, além de limitar a dissipação de calor da célula defeituosa. Afim de evitar um custo ainda maior, normalmente não se utiliza um diodo *by-pass* para cada célula (CRESESB, 2008). Já, os diodos de bloqueio impedem que as correntes reversas passem pelo módulo, essas que, podem surgir ao conectar um módulo diretamente em uma bateria. É indispensável a utilização desses diodos, uma vez que essas correntes podem ocasionar a perda total do fluxo de energia do módulo fotovoltaico (CRESESB, 2008).

Para uma melhor escolha da utilização de módulos fotovoltaicos e que satisfaça o consumidor é necessária uma atenção especial à alguns aspectos, tais como: diodo *by-pass*, coeficiente de temperatura, custos dos módulos fotovoltaicos, garantia,



eficiência, tipo, fabricante, tolerância de potência, entre outros (PORTAL SOLAR, 2016).

### 2.3.5 Inversores de Frequência

Durante todo o processo de conversão de energia solar em energia elétrica, os módulos fotovoltaicos geram tensão contínua tornando a utilização da mesma limitada (FIGUEIRA, 2014). Dessa forma, é necessário a utilização de inversores, que são responsáveis pela conversão da energia em corrente contínua (CC) proveniente dos módulos fotovoltaicos em energia em corrente alternada (CA) (VILLAVA, 2013).

Basicamente existem dois tipos de inversores, aqueles que são ligados diretamente à rede elétrica (*grid-tie*) e os inversores autônomos, que são isolados da rede elétrica.

Os inversores *grid-tie*, ou inversores conectados à rede, transferem a energia gerada diretamente ao quadro de distribuição e são ainda utilizados para sincronizar a energia proveniente dos módulos fotovoltaicos com a energia disponibilizada pela concessionária, ou seja, se a rede estiver sem energia, o inversor isola o sistema fotovoltaico da rede, proporcionando segurança ao sistema e garantindo que não haja conflito entre as duas fontes de energia. Além dessas funções, os inversores *grid-tie* devem proteger o sistema contra desvios na frequência ou tensão, sobrecargas e ilhamentos (FIGUEIRA, 2014) (PORTAL SOLAR, 2016). Por não possuir um dispositivo de armazenamento, toda energia excedente, ou seja, toda aquela energia produzida que não é utilizada pela residência ou pela empresa é enviada de volta à rede convencional de energia elétrica (ECYCLE, 2017).

Por sua vez, os inversores autônomos, ou inversor solar *off-grid*, é utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados (são independentes da rede de distribuição de energia elétrica), e tem como principal objetivo alimentar diretamente as cargas, retirando a energia proveniente do banco de baterias. Como não possuem capacidade de interagir com o sinal da corrente alternada presente na rede, os inversores autônomos não podem ser utilizados em sistemas *on-grid* (conectados à rede) (FIGUEIRA, 2014). A energia excedente produzida é armazenada nas baterias e utilizada pelo sistema em momentos de poucas ou nenhuma incidência de sol, como os períodos noturnos (ECYCLE, 2017).

Na Figura 19 apresenta um quadro comparativo entre esses dois tipos de inversores evidenciando as principais vantagens e desvantagens de cada um.

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Off-Grid	Pode ser utilizado em regiões remotas, por ser independente da rede de distribuição de energia	Necessita da utilização de baterias e controladores de carga
	Não há necessidade de pagar conta de luz	Custo mais elevado
	Possui sistema de armazenamento de energia	Menos eficiente
On-Grid	Dispensa a utilização de baterias e controladores de carga	Necessita do acesso à rede de distribuição
	Possibilita ao consumidor adquirir créditos de energia	Não há sistema de armazenamento de energia
	Créditos podem ser usados em outras unidades consumidoras do mesmo proprietário	Necessidade de pagar conta de luz quando a demanda for maior que a produção e não houverem créditos disponíveis
	Mais eficiente	

Figura 19 - Quadro comparativo entre os inversores autônomos (*on-grid*) e não autônomos (*off-grid*).

Fonte: Figura extraída de (<http://www.ecycle.om.br>).

## 2.3.6 Sistemas Fotovoltaicos

Sistema fotovoltaico é um conjunto de equipamentos utilizados na conversão de energia solar em energia elétrica. Esses sistemas podem ser classificados em três tipos: isolados (*off-grid*), conectadas à rede (*on-grid*) e híbridos. A escolha da melhor configuração a ser utilizada depende da disponibilidade dos recursos energéticos e da aplicação a ser utilizada (FIGUEIRA, 2014).

### 2.3.6.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

Sistemas isolados, também conhecido como sistemas autônomos ou sistemas *off-grid*, como ele se define, são independentes da rede convencional de energia elétrica e habitualmente empregados em locais onde não há disponibilidade do fornecimento de energia elétrica. Com isso, para a utilização deste tipo de sistema é extremamente necessário algum dispositivo para armazenamento da energia gerada (CUNHA, 2006).

Normalmente esse armazenamento é feito por baterias que são carregadas pelos módulos fotovoltaicos durante o período de luz do sol. Afim de evitar possíveis

danos, um controlador de carga e descarga é conectado nas baterias (CRESESB, 2008).

Neste tipo de sistema, para alimentar cargas de baixa tensão e corrente contínua (CC) conecta-se os equipamentos diretamente ao regulador de carga e descarga. Para a alimentação de cargas alternadas (CA) é necessário a utilização do inversor (CRESESB, 2008). A Figura 20 ilustra as características de um sistema fotovoltaico isolado.

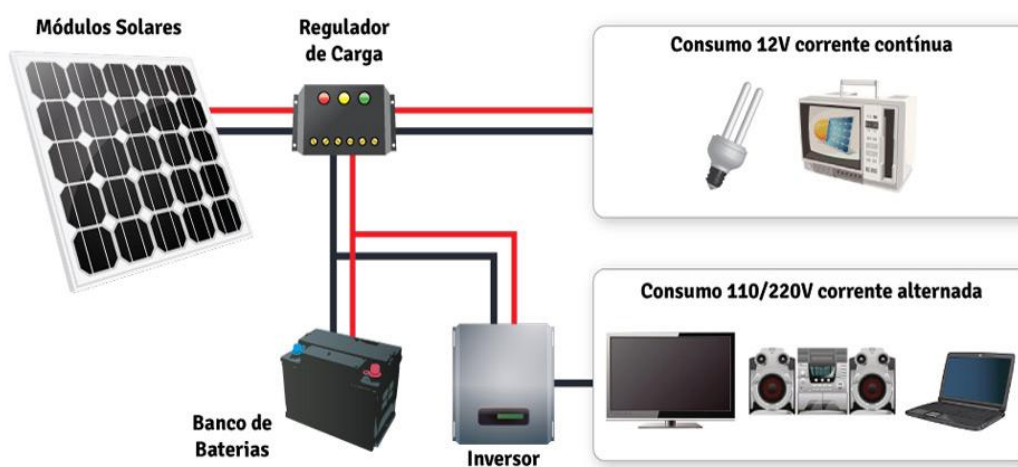


Figura 20 - Sistema fotovoltaico isolado – *off-grid*.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.fasorengenharia.com.br>).

### 2.3.6.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Sistemas conectados à rede, também conhecidos como sistemas *on-grid*, são conectados à rede convencional de energia elétrica e empregados em locais já atendidos por energia elétrica (VILLALVA, 2013). Diferenciando-se somente pela potência, estes sistemas podem ser classificados em pequeno, médio ou grande porte.

Este sistema opera em paralelo à rede elétrica, permitindo que toda energia gerada excedida, ou seja, quando os módulos fotovoltaicos geram energia superior à demanda do consumidor seja injetada na rede convencional de energia, gerando um crédito energético para os consumidores. Por outro lado, quando a produção de eletricidade é insuficiente para suprir a demanda, a rede convencional de energia fornece a eletricidade restante (VILLALVA, 2013).

Como se trata de um sistema complementar ao sistema convencional de fornecimento de energia elétrica, torna imprescindível a utilização de inversores, os quais devem atender a critérios rígidos de segurança e qualidade. Em vista disso, para realizar um balanço correto entre a energia consumida e gerada, é utilizado um medidor bidirecional. A Figura 21 apresenta um sistema conectado à rede elétrica e suas respectivas características.

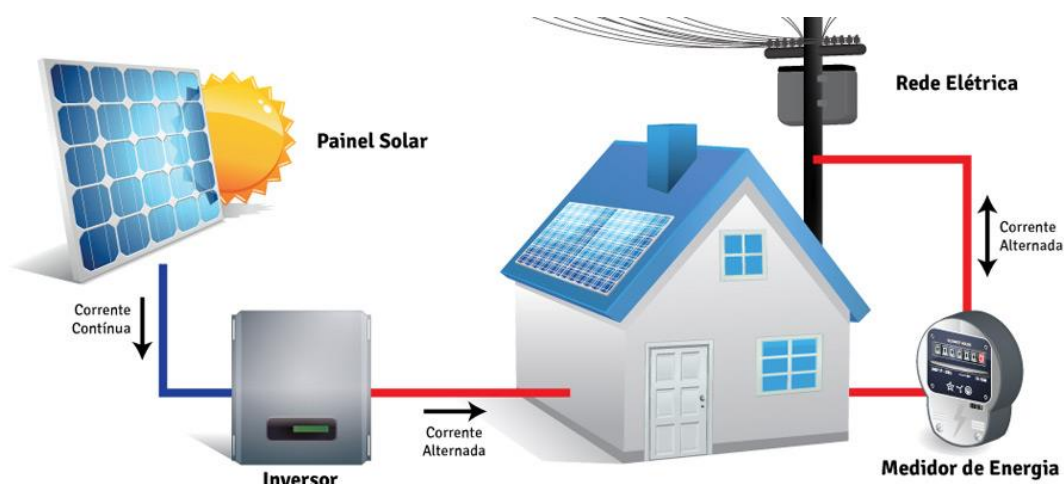


Figura 21 - Sistema fotovoltaico conectado à rede – *on-grid*.

Fonte: Figura extraída de (<https://www.real-solar.com/>).

### 2.3.6.3 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

Quando os sistemas podem ser tanto isolados quanto conectados à rede, são denominados híbridos. Diferentemente dos demais sistemas, este pode ser formado por mais de uma fonte de energia, tais como: energia solar, eólica, entre outras. (CRESESB, 2008).

Por consequência do uso de várias fontes de geração, estes sistemas são mais complexos, tornando necessário o controle de potência de todas as fontes e normalmente são utilizados em sistemas de médio e grande porte (CRESESB, 2008) (BOSO; GABRIEL; FILHO, 2015). A Figura 22 mostra o sistema e suas principais características.



Figura 22 - Sistema fotovoltaico híbrido.

Fonte: (CRESESB, 2008).

Após a apresentação conceitual dos componentes que compõem e caracterizam os sistemas fotovoltaicos, na próxima seção é discutido o potencial energético do estado brasileiro de Minas Gerais, para que posteriormente seja apresentado o potencial nos demais países em questão.

## 2.4 Potencial Energético de Minas Gerais

A partir da Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que possibilitou a conexão de microgeradores no sistema de distribuição das concessionárias de energia elétrica, a energia solar conectada na rede já é realidade no Brasil, este que, recebe elevados índices de radiação solar praticamente durante todos os meses do ano (ANEEL, 2017).

Dentre os diversos estados e regiões espalhadas por todo o território brasileiro, o estado de Minas Gerais tem grande potencial para geração de energia solar fotovoltaica.

Segundo o levantamento do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, desenvolvido pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), tem-se que o potencial mineiro de irradiação solar para geração de energia é praticamente o dobro do potencial da Alemanha, país que se destaca pelo aproveitamento e produção da energia proveniente do sol. A radiação média das regiões mineiras varia entre 5,5 e 6,5

kWh/m<sup>2</sup> enquanto a radiação solar na Alemanha possui valores em torno de 3 kWh/m<sup>2</sup> (ATLAS SOLARIMÉTRICO DE MINAS GERAIS, 2016).

Dados divulgados pela Associação Brasileira de Energia Solar (ABSolar) mostram que Minas Gerais é referência nacional na geração distribuída de energia solar, que se entende por aqueles sistemas em que o próprio consumidor produz a energia, normalmente instalados em telhados de residências, prédios, comércios indústrias e propriedades rurais. (PORTAL SOLAR, 2016).

A capacidade de geração distribuída do estado é de aproximadamente 37,9 MW, volume que é bastante superior ao segundo colocado, Rio Grande do Sul, com 26 MW (ATLAS SOLARIMÉTRICO DE MINAS GERAIS, 2016). Segundo estudos técnicos realizados pela CEMIG, as seis microrregiões com maiores potências no estado são:

- Janaúba;
- Januária;
- Pirapora e Unaí;
- Pirapora e Paracatu;
- Curvelo e Três Marias;
- Patrocínio.

A região Norte, que diante da seca histórica, sempre considerou o Sol um castigo, agora pode receber grandes investimentos no aproveitamento da energia proveniente do sol, já que concentra três regiões. O mapa solarimétrico mostra que no Norte do estado os equipamentos de geração e aproveitamento de energia solar são mais eficientes e apresentam melhores rendimentos que as demais partes do estado. No norte de Minas, um determinado sistema fotovoltaico de aproximadamente 1 kWp produz 1.489 kWh de energia durante 1 ano, enquanto o mesmo equipamento instalado na Zona da Mata produz 1.258 kWh de energia ao ano, ou seja 16% a menos (ATLAS SOLARIMÉTRICO DE MINAS GERAIS, 2016).

A disponibilidade de terras planas, degradadas ou de pouca utilidade também é um ponto forte na região norte de Minas Gerais, cujo mapeamento realizado somente nesta região, estimou-se que há 120 áreas propícias para a instalação de unidades de geração de energia (PORTAL SOLAR, 2016).

A Figura 23 mostra a radiação solar média diária anual no estado de Minas Gerais.



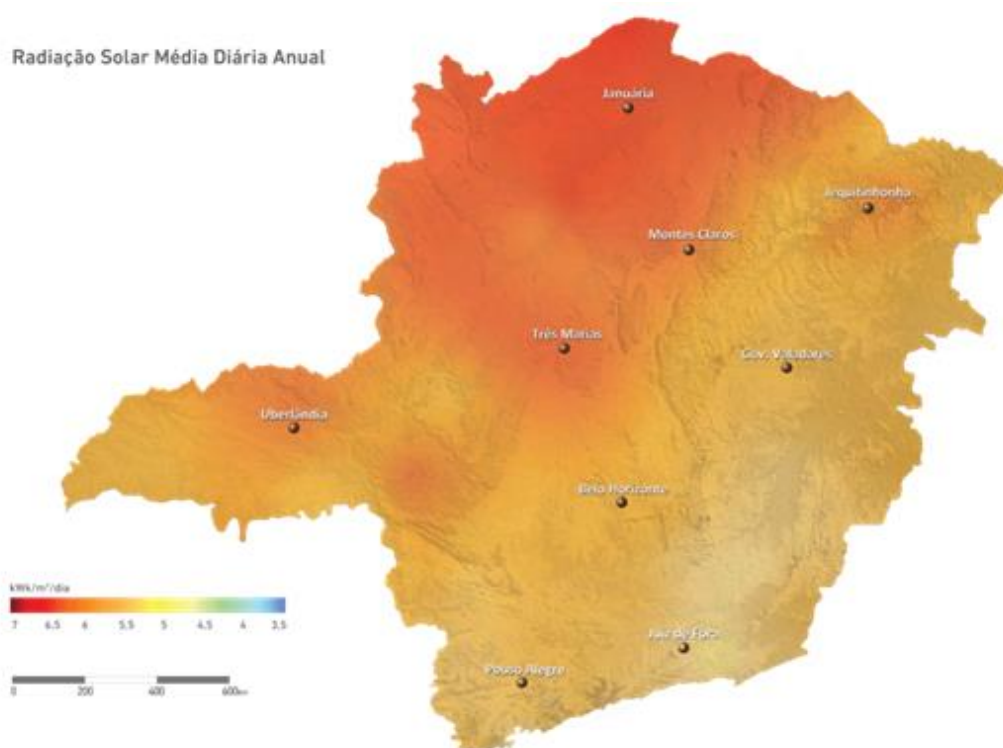


Figura 23 - Radiação Solar Média Diária Anual.

Fonte: Figura extraída de (ATLAS SOLARIMÉTRICO DE MINAS GERAIS, 2016).

Diante dessas características favoráveis, nos últimos anos, grandes empresas estrangeiras e nacionais mostraram interesse no potencial energético local. Recentemente, o próprio governo mineiro aprimorou a legislação ambiental e ofereceu maiores incentivos, atraindo investimentos, gerando emprego e renda na região (MME, 2018).

Segundo informações fornecidas da Agência Brasileira de Energia Elétrica (ANEEL), cinco empreendimentos, localizados no município de Pirapora, já entraram em operação. Juntas, as usinas geram 150 MW de potência, números que são suficientes para suprir 123 mil residências médias, com consumo individual médio de aproximadamente 250 kWh/mês. O investimento total nos cinco empreendimentos foi de R\$ 640,8 milhões. Outros 12 empreendimentos estão previstos para serem instalados na região nos próximos anos. Até o final do primeiro semestre de 2018, oito destes empreendimentos devem entrar em operação nas regiões de Pirapora e Paracatu. O investimento total que ultrapassa R\$ 1 bilhão (AGÊNCIA BRASILEIRA DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2017).

Assim que os dezessete empreendimentos entrarem em operação, a energia gerada será equivalente ao consumo de aproximadamente 400 mil residências.

Afim de exemplificar o que foi apresentado neste capítulo, a próxima subseção mostra um pouco da energia solar de Pirapora.

#### 2.4.1 Usina Solar de Pirapora

A maior usina fotovoltaica da América Latina, operada pela empresa EDF *Energies Nouvelles* (EDF EN), com um terreno do tamanho de 1.500 campos de futebol e mais de um milhão de painéis solares se perdem no horizonte em um espaço de 800 hectares, na região de Pirapora (MG). Em uma planície 350 Km ao norte de Belo Horizonte, esta usina pretende recuperar o atraso do Brasil na indústria solar. Essa usina, em operação conjunta de todos os módulos, terá uma capacidade de 400 MW, que poderia fornecer energia para 420 mil casas durante um ano (EDF EN, 2017).

Os painéis, colocados há 1,20 m do solo, estão inclinados e giram acompanhando os movimentos do sol, com o auxílio de um dispositivo também alimentado pela energia solar. Com sol a pino, aproximadamente meio-dia, os painéis ficam praticamente horizontais. Quando o céu está nublado, a produção continua, mas diminui cerca de 30% (EDF EN, 2017). A Figura 24 mostra a usinada instalada em Pirapora.



Figura 24 – Usina Solar de Pirapora - MG.

Fonte: (EDF EN, 2017).



## 2.5 Potencial Solar dos Países Referências Mundiais em Produção de Energia Solar Fotovoltaica

Tanto pelo fato de ser uma energia limpa quanto pela economia gerada, a energia fotovoltaica é uma tendência mundial e a parte majoritária do mercado tende a adotar esse tipo de energia com o tempo.

Dados divulgados pela *United Nations Environment Programme* (PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) mostra que em 2015, foram investidos 44,1 bilhões de dólares em fonte de energia renováveis. Aproximadamente 30 milhões deste valor foi utilizado para a geração de energia solar (UNEP, 2016).

Segundo a *International Energy Agency* (IEA), no ano de 2016, a capacidade mundial de energia solar fotovoltaica aumentou 76,1 GW, cerca de 50% a mais do que no ano de 2015, que até então era o recorde no setor, com aproximadamente 50 GW de capacidade de potência instalada. Atualmente, mundialmente, a capacidade de energia instalada atingiu incríveis 401 GW, um grande e significativo avanço em relação aos anos anteriores. China e Estados Unidos são os grandes responsáveis pelo crescimento, que praticamente dobraram a quantidade de energia solar de 2015. A China acrescentou 34,2 GW e os EUA adicionaram 14 GW, cuja, somente a cidade de Nova Iorque aumentou em 800% o uso de energia solar. (SUN VOLT, 2017).

Neste trabalho, decidiu-se explorar três cidades dos três líderes mundiais de capacidade de geração fotovoltaica no mundo: Guiyang (China), Shimogou (Japão) e Göttingen (Alemanha), como mostrado na Figura 1 (ABSOLAR, 2017).

### 2.5.1 China

Com equivalente a um quarto de toda energia fotovoltaica gerada no mundo, a China se encontra no topo do ranking dos países com maior capacidade instalada de energia solar, fechando o ano de 2017 com incríveis 130,25 GW, que representa 7,3% da matriz energética chinesa (MARTINS JÚNIOR; LOPES JÚNIOR; SIVAL JÚNIOR, 2017). Na Figura 25 pode-se verificar a distribuição da radiação solar anual média. É possível visualizar também que em regiões com valores superiores a 1800 kWh/m<sup>2</sup>, geralmente são regiões não-habitadas, indicando assim um potencial solar pouco aproveitado, conforme apresentado em Che et al., (2005).

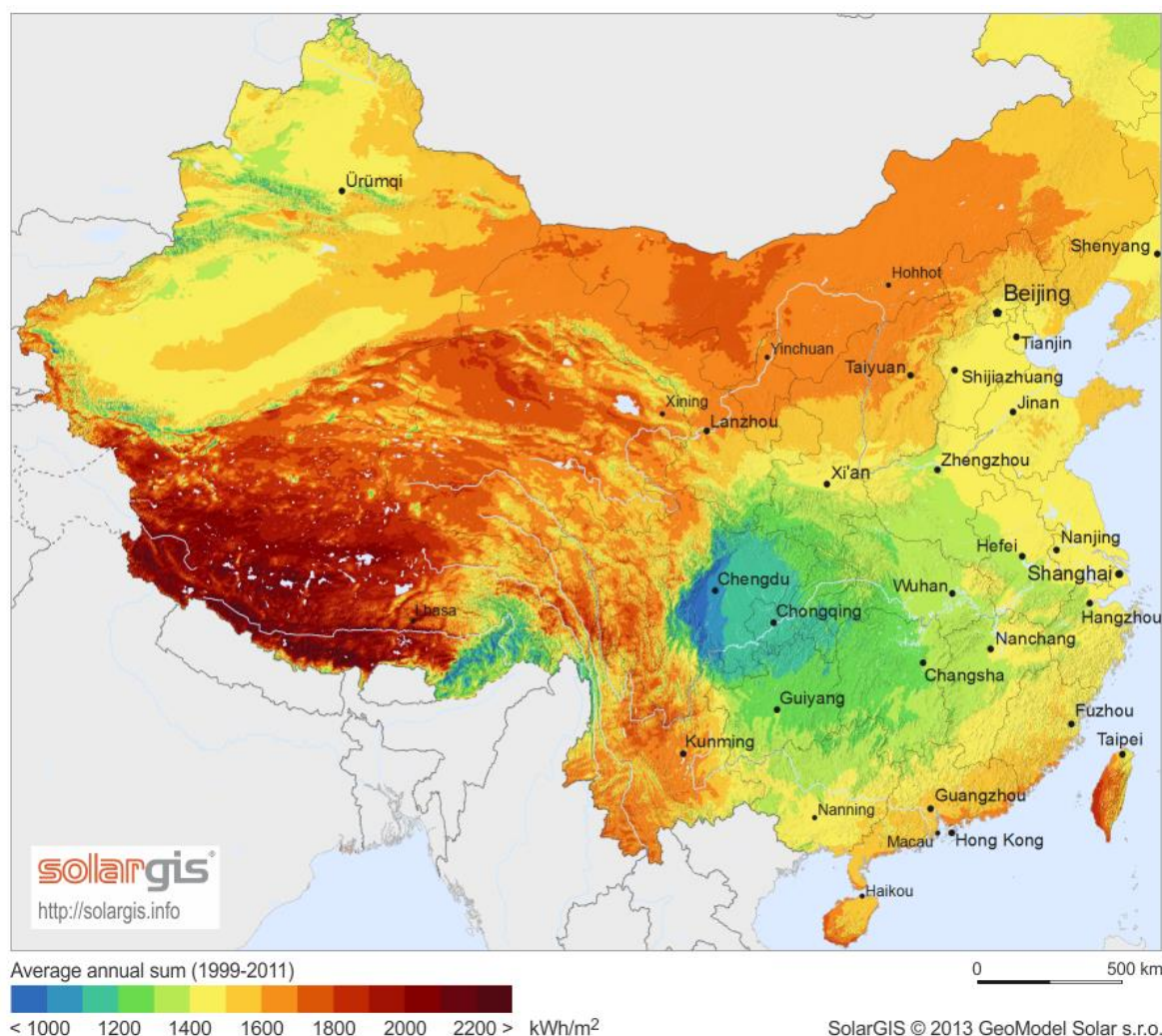


Figura 25 - Irradiação solar da China.

Fonte: Figura extraída de (<http://solargis.info>)

No final de 2017, conforme informações apresentadas na Figura 26, as instalações fotovoltaicas do país alcançaram 130,25 GW, onde 94 GW representam usinas fotovoltaicas enquanto o restante, 36 GW representam sistemas distribuídos de sistemas fotovoltaicos. Estima-se que o país tenha acrescentado 20 GW em instalações fotovoltaicas distribuídas durante todo o ano de 2017, das quais 12,15 GW são de instalações distribuídas encontradas nos telhados de residências, indústrias e comércios (RENEWABLE ENERGY WORLD, 2018).

Com um rápido aumento no número de instalações fotovoltaicas em 2017 e um crescimento anual de aproximadamente 53%, os especialistas preveem um ano de 2018 promissor para o país. O mercado chinês deve se expandir para 180 GW no ano de 2018 (RENEWABLE ENERGY WORLD, 2018).



Figura 26 - Capacidade de energia fotovoltaica instalada na China.

Fonte: Figura extraída de (*Asia Europe Clean Energy*, 2018).

O atual ambiente econômico, juntamente com contínuas melhorias tecnológicas e reestruturação do mercado abre oportunidades para muitos produtores da indústria fotovoltaica, levando a transformação geral do setor, onde se prevê, no ano de 2020 um cumulativo de 230 GW de capacidade fotovoltaica instalada (RENEWABLE ENERGY WORLD, 2018).



Figura 27- Parque solar Longyangxia Dam, China.

Fonte: Figura extraída de (*Asia Europe Clean Energy*, 2018).

Como exemplo, pode-se utilizar a maior fazenda de energia solar do mundo, localizada na província de Qinghai, no planalto de Tibete, com um custo de aproximadamente R\$ 2,8 bilhões, e que pode ser visualizada na Figura 27. *Longyangxia Dam* possui 27 quilômetros quadrados de painéis solares, com a capacidade de produzir cerca de 850 MW de energia por ano, números que são suficientes para abastecer cerca de 200 mil lares (THE GUARDIAN, 2017).

### 2.5.2 Japão

Desde o incidente nuclear de Fukushima, o Japão está transformando seu setor de energia, e os combustíveis fósseis serão os principais perdedores dessa transformação. Com aproximadamente US\$ 20 bilhões investidos anualmente em novas tecnologias e desenvolvimentos solares que estão proporcionando 8 GW ao ano de eletricidade proveniente da energia solar. O Japão é um dos três maiores mercados globais de capacidade fotovoltaica instalada (ECOIA, 2016). Na Figura 28 pode-se visualizar o potencial solar do Japão, e verificar que o valor de radiação solar média anual é da ordem de 1.300 kWh/m<sup>2</sup>, que representa um valor inferior ao valor médio brasileiro que é da ordem de 2.000 kWh/m<sup>2</sup> (M. JÚNIOR, 2016).

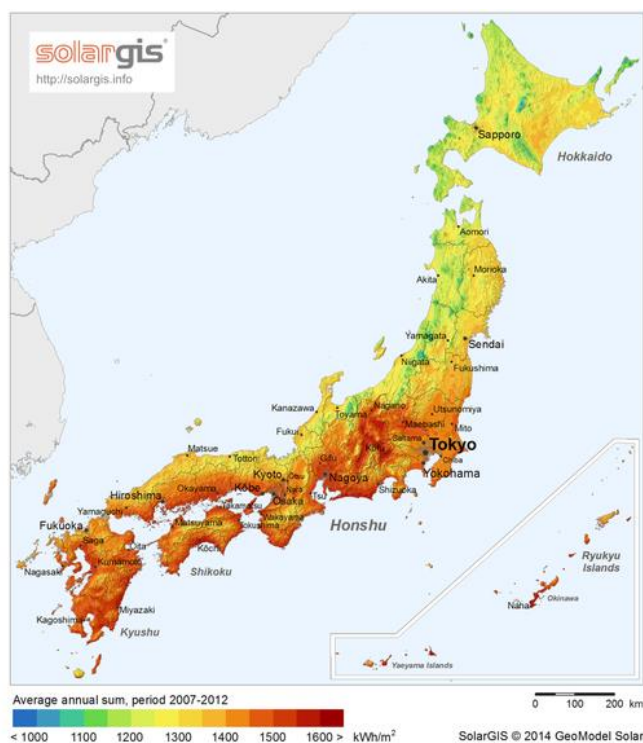


Figura 28 - Irradiação solar do Japão.

Fonte: Figura extraída de (<http://solargis.info>).



Segundo relatório publicado em 2017 pelo Instituto de Economia da Energia e Análise Financeira (IEEFA), estima-se que até o ano de 2020, o total de instalações solares japonesas podem ultrapassar 50 GW (SETOR ENERGÉTICO, 2018).

Um documento publicado em abril de 2016, pela Associação de Energia Fotovoltaica do Japão, apresenta uma estratégia que o país pode chegar a 100 GW de capacidade de geração fotovoltaica instalada em 2030, como uma geração anual maior que 110 TWh de produção de eletricidade proveniente do sol, o que equivale aproximadamente 15% da demanda total de eletricidade do Japão (ECOJA, 2016).

Diante dessa transformação do setor energético no Japão, existem diversos projetos que auxiliam e contribuem nesses números. Um bom exemplo é a recém-inaugurada cidade localizada no leste do Japão, cerca de 50 Km da capital Tóquio. Chamada de *Fujisawa Sustainable Smart Town*, ou simplesmente Fujisawa SST, construída em um terreno de 180 mil metros quadrados (área equivalente à quase 25 Maracanãs) e consumindo poucos recursos naturais, toda a cidade funciona de maneira inteligente, cuja 30% de sua matriz energética é proveniente de fontes renováveis, que têm a solar como principal fonte de abastecimento.



Figura 29 - Cidade inteligente de Fujisawa, Japão.

Fonte: Figura extraída de (PANASONIC, 2017).

O projeto é desenvolvido por uma parceria de sete empresas japonesas e uma norte-americana juntamente com a Panasonic e segundo projeções das mesmas, até o final de 2018, cerca de 3 mil pessoas devem habitar Fujisawa (PANASONIC, 2017).

### 2.5.3 Alemanha

Um dos países mais industrializados do mundo, a Alemanha, em 2016 atingiu um marco histórico na geração de energia. Em 2016, 95% de sua demanda de energia elétrica foram supridas através de fontes renováveis, cuja energia solar, representa participação majoritária, com 45,2%, seguido pela energia eólica, biomassa e usinas hidrelétricas, com números de 36%, 8,9% e 4,8% respectivamente (HANNNE, 2017).

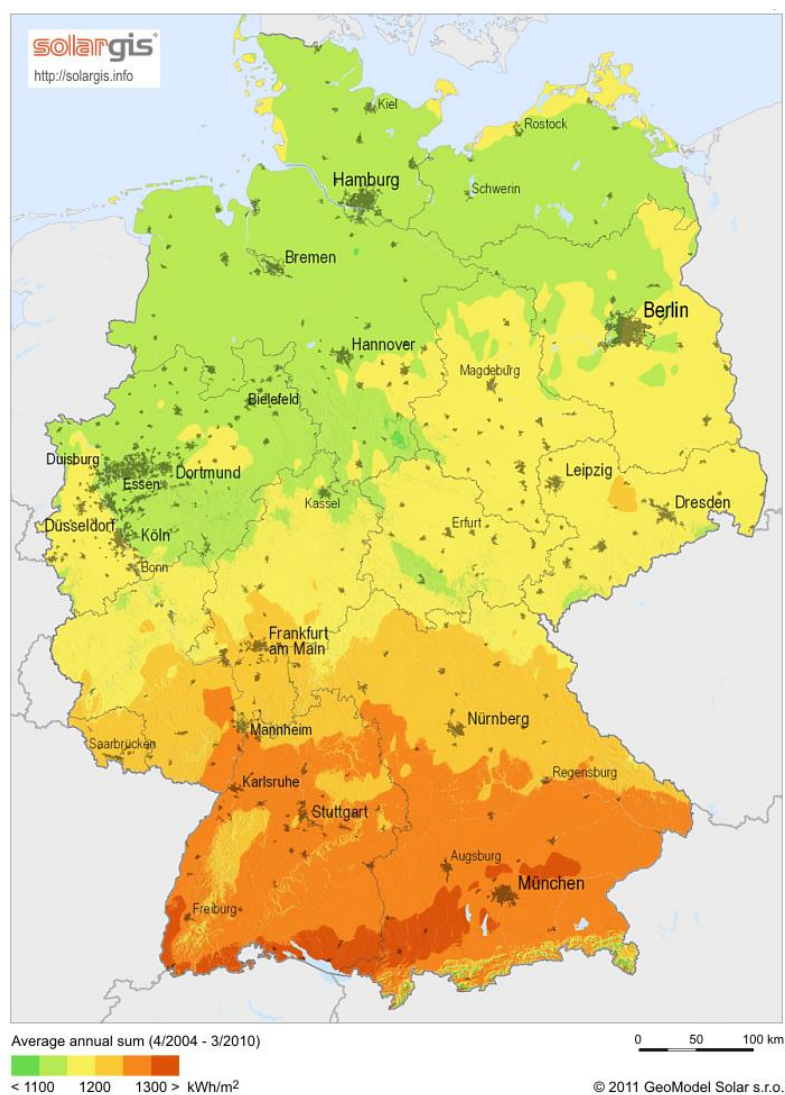


Figura 30 - Irradiação na Alemanha.

Fonte: Figura extraída de (<http://solargis.info>).

Segundo o órgão regulador alemão *Bundesnetzagentur*, a Alemanha, em meados de abril de 2017 adicionou cerca de 131,1 MW de novos sistemas fotovoltaico, onde 13,1 MW desta capacidade são representados por plantas terrestres construídas no terreno. Novas adições de 111 MW no mês de maio, 122,4 MW no mês de fevereiro e 117,2 MW no mês de janeiro totalizou uma capacidade acumulativa de geração de energia fotovoltaica de 41,70 GW (BUNDESNETZAGENTUR, 2018).

Este é um feito magnífico para um país que possui grande necessidade energética devido à sua natureza industrial e incidência de luz solar menor que 90% do resto da população mundial, conforme Figura 30.

Atualmente, um plano governamental, denominado *Energiewende*, que representa a transição de uma Alemanha baseada em energia nuclear para uma Alemanha de energia limpa. Até o final de 2022, o país pretende desativar todas as suas usinas nucleares e total popularização da energia solar com o intuito de alcançar nos próximos 35 anos o índice de 100% de toda sua energia produzida (BUNDESNETZAGENTUR, 2018).



Figura 31 - Vilarejo de Schlierberg, Alemanha.

Fonte: Figura extraída de (<http://www.hypeness.com.br>).

Um vilarejo conhecido como *Schlierberg*, localizado em Friburgo é um bom exemplo deste projeto governamental. Em uma área de 11 mil m<sup>2</sup>, o local é composto



de 59 residências e 1 edifício comercial, chamado *Sun Ship* e têm a energia solar como única fonte de eletricidade, com uma capacidade de geração 4 vezes maior do que é necessário para o próprio consumo, indicando total autossuficiência energética (PORTAL SOLAR, 2016).

Por fim, pode-se ressaltar que os países mais desenvolvidos no mundo, tais como a China, Japão e Alemanha, chegaram neste patamar devido suas políticas de desenvolvimento de energia alternativa, uma vez que os três países apresentam valores de radiação solar anual média, inferior ao estado de Minas Gerais, conforme mostrado nesta seção. Dessa forma, um dos objetivos deste trabalho é apresentar alguns possíveis exemplos de diversificação da aplicação da energia solar fotovoltaica no mundo, bem como apresentar o potencial solar fotovoltaico pouco explorado no estado de Minas Gerais, mais precisamente a cidade de Formiga. Dito isso, no próximo capítulo é apresentado o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho de conclusão de curso.



### 3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Como forma de verificar o potencial solar fotovoltaico da cidade de Formiga/MG em relação as três cidades localizadas em países líderes de geração fotovoltaica: Guiyang (China), Shimogou (Japão) e Göttingen (Alemanha), neste capítulo, apresentou-se o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de uma residência. Posteriormente realizou-se um estudo comparativo entre os sistemas dimensionados e os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 4.

#### 3.1 Projeto do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

As quatro cidades selecionadas para a realização do dimensionamento do sistema, e que podem ser visualizadas no mapa da Figura 32, são:

- Formiga – Brasil;
- Guiyang – China;
- Shimogou – Japão;
- Göttingen – Alemanha.



Figura 32 - Localização das cidades analisadas.

Fonte: Figura extraída de (Google Maps, 2018)

Considerou-se uma residência, cuja demanda seja igual a 170 kWh/mês, valor equivalente ao consumo residencial mensal médio no território brasileiro (EPE, 2018).

O sistema fotovoltaico escolhido para a realização do dimensionamento, foi o sistema conectado à rede (*on-grid*), considerando a ausência de baterias, visando assim, uma redução no custo do sistema dimensionado.

A partir da escolha das cidades, utilizou-se o *Google Maps* para encontrar as coordenadas geográficas das mesmas.

Tabela 2 - Coordenadas geográficas das cidades selecionadas.

Cidade - País	Longitude	Latitude
Formiga - Brasil	-45.42792°	-20.46433°
Göttingen - Alemanha	9.93604°	51.52788°
Guiyang - China	108.70312°	26.36825°
Shimogou - Japão	139.89551°	37.16732°

Fonte: (*Google Maps*, 2018).

A partir das informações apresentadas na Tabela 2, foi possível utilizar o PV\*Sol *Online* (<http://pvsol-online.valentin-software.com>) que é um *software* gratuito que auxilia no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Por meio do *software* obteve-se os valores de irradiação média diária, mensal e anual e da temperatura média mensal para cada cidade, onde os valores podem ser visualizados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 - Valores de temperatura média, irradiação solar mensal e diária de Formiga – Brasil e Göttingen – Alemanha.

Mês	Formiga – Brasil			Göttingen – Alemanha		
	Temp. média (°C)	kWh/m <sup>2</sup> por mês	kWh/m <sup>2</sup> por dia	Temp. média (°C)	kWh/m <sup>2</sup> por mês	kWh/m <sup>2</sup> por dia
Janeiro	23	175	5,65	1	20	0,65
Fevereiro	24	174	6,21	1	38	1,36
Março	23	159	5,13	5	74	2,39
Abril	22	145	4,83	8	113	3,77
Mai	20	140	4,52	13	144	4,65
Junho	18	133	4,43	15	152	5,07
Julho	18	144	4,65	18	154	4,97
Agosto	20	169	5,45	18	129	4,16
Setembro	21	166	5,53	14	85	2,83
Outubro	23	170	5,48	10	50	1,61
Novembro	22	158	5,27	5	22	0,73
Dezembro	21	165	5,32	3	14	0,45
<b>Média</b>	<b>21,2</b>	<b>158,2</b>	<b>5,21</b>	<b>9,2</b>	<b>82,9</b>	<b>2,72</b>

Fonte: PV\*Sol *Online* (<http://pvsol-online.valentin-software.com>).

Tabela 4 - Valores de temperatura média, irradiação solar mensal e diária de Guiyang – China e Shimogou – Japão.

Mês	Guiyang – China			Shimogou – Japão		
	Temp. média (°C)	kWh/m <sup>2</sup> por mês	kWh/m <sup>2</sup> por dia	Temp. média (°C)	kWh/m <sup>2</sup> por mês	kWh/m <sup>2</sup> por dia
Janeiro	8	55	1,77	1	74	2,39
Fevereiro	11	62	2,21	2	93	3,32
Março	15	75	2,42	5	122	3,94
Abril	20	91	3,03	10	141	4,70
Mai	24	114	3,68	15	149	4,81
Junho	26	109	3,63	19	128	4,27
Julho	28	131	4,23	23	141	4,55
Agosto	27	137	4,42	24	134	4,32
Setembro	24	119	3,97	19	103	3,43
Outubro	20	97	3,13	14	88	2,84
Novembro	15	83	2,77	8	73	2,43
Dezembro	9	66	2,13	3	66	2,13
<b>Média</b>	<b>19</b>	<b>94,9</b>	<b>3,12</b>	<b>11,8</b>	<b>109,3</b>	<b>3,59</b>

Fonte: PV\*Sol *Online* (<http://pvsol-online.valentin-software.com>).

Tabela 5 - Valores de irradiação solar média anual das cidades analisadas.

Cidade - País	Irradiação anual (kWh/m <sup>2</sup> )
Formiga – Brasil	1897,8
Göttingen – Alemanha	993,1
Guiyang – China	1138,1
Shimogou – Japão	1314,3

Fonte: PV\*Sol *Online* (<http://pvsol-online.valentin-software.com>).

De posse dos valores apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, pode-se dimensionar os módulos (painéis) fotovoltaicos para cada cidade selecionada.

### 3.2 Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos

Para realizar o dimensionamento dos módulos (painéis) fotovoltaicos é necessário utilizar a Equação (1) para calcular a potência do sistema como um todo (PINHO, J.T.; GALDINO, M. A, 2014),

$$P_{fv} = \frac{E}{TD \cdot HSP_{ma}}, \quad (1)$$

onde  $P_{fv}$  é a potência do sistema fotovoltaico (Wp),  $E$  é o consumo diário médio da região analisada (Wh/dia),  $TD$  é a taxa de desempenho do sistema (adimensional) e  $HSP_{max}$  é a quantidade de horas de sol pleno diário médio (h/dia). Neste sistema, tem-se o  $TD$  que leva em conta algumas perdas encontradas no sistema, tais como o sombreamento no módulo solar, eficiência do inversor e uma possível redução de potência (PINHO, J. T.; GALDINO, M. A., 2014), considerou-se o valor igual a 0,7 (70%).

A partir dos dados obtidos o consumo médio mensal e diário da residência, é 170 kWh e 5,67 kWh, respectivamente, pode-se determinar a potência de cada sistema instalado:

- Formiga – Brasil:

$$P_{fv} = \frac{5,67 \cdot 1000}{0,70 \cdot 5,21} = 1554,70 \text{ Wp},$$

- Guiyang – China:

$$P_{fv} = \frac{5,67 \cdot 1000}{0,70 \cdot 3,12} = 2596,15 \text{ Wp},$$

- Shimogou – Japão:

$$P_{fv} = \frac{5,67 \cdot 1000}{0,70 \cdot 3,59} = 2256,27 \text{ Wp},$$

- Göttingen – Alemanha:

$$P_{fv} = \frac{5,67 \cdot 1000}{0,70 \cdot 2,72} = 2977,94 \text{ Wp}.$$

Com a potência de cada sistema calculada, pode-se escolher um módulo fotovoltaico. O critério de seleção do painel foi baseado em sua maturidade tecnológica e custo-benefício, ou seja, os módulos produzidos pela Yingli Solar apresentam uma eficiência em torno de 16% e um custo da ordem dos demais painéis disponíveis comercialmente (YINGLI SOLAR, 2018). Diante disso, de acordo com o *datasheet* do equipamento escolhido, as especificações técnicas são apresentadas na Tabela 6 (PORTAL SOLAR, 2018).

Tabela 6 - Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico escolhido.

Fabricante	Yingli Solar
Modelo	YL295P – 35b
Tecnologia	Silício Policristalino
Potência Nominal	295 W
Eficiência	15,2 %
Área do Painel	1,95 m <sup>2</sup>
Peso	26,8 kg
Tensão de Circuito Aberto (V <sub>oc</sub> )	45 V
Coefficiente de Temperatura da Tensão	0,32 %/°C
Vida Útil	25 anos

Fonte: (PORTAL SOLAR, 2018).

Feito isso, utilizando a Equação (2), pode-se determinar a quantidade mínima de módulos solares necessários para gerar energia e suprir a demanda do consumo médio diário de cada residência,

$$N_{PFV} = \frac{P_{fv}}{P_N}, \quad (2)$$

onde  $N_{PFV}$  é o número de painéis fotovoltaicos,  $P_{fv}$  é a potência do sistema fotovoltaico (Wp) e  $P_N$  é a potência nominal do painel fotovoltaico (W), cujo valor pode ser encontrado na Tabela 6. Assim, pode-se calcular o número de painéis para cada sistema,

- Formiga – Brasil:

$$N_{PFV} = \frac{1554,70 \text{ Wp}}{295 \text{ W}} = 5,27 = 5 \text{ painéis,}$$

- Guiyang – China:

$$N_{PFV} = \frac{2596,15 \text{ Wp}}{295 \text{ W}} = 8,80 = 9 \text{ painéis,}$$

- Shimogou – Japão:

$$N_{PFV} = \frac{2256,27 \text{ Wp}}{295 \text{ W}} = 7,65 = 8 \text{ painéis,}$$

- Göttingen – Alemanha:

$$N_{PFV} = \frac{2977,94 \text{ Wp}}{295 \text{ W}} = 10,09 = 10 \text{ painéis.}$$

A Tabela 7 apresenta a relação da potência, o número de módulos instalados e a área a ser instalada em cada sistema analisado.

Tabela 7 - Relação dos sistemas obtidos.

Cidade - Região	Potência do Sistema (Wp)	Números de módulos fotovoltaicos	Área a ser instalada (m <sup>2</sup> )
Formiga - Brasil	1554,70	5	9,75
Göttingen - Alemanha	2977,94	10	19,50
Guiyang - China	2596,15	9	17,55
Shimogou - Japão	2256,27	8	15,60

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Entretanto, de acordo com o fabricante Yingli, o painel do fotovoltaico possui uma perda de 8,8% após dez anos de uso (FIGUEIRA, 2014), com isso a Tabela 7 pode ser corrigida, e os novos valores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Relação dos sistemas obtidos.

Cidade - Região	Potência do Sistema com a correção de perda (W)	Números de módulos fotovoltaicos	Área a ser instalada (m <sup>2</sup> )
Formiga - Brasil	1691,52	6	11,70
Göttingen - Alemanha	3240,00	11	21,45
Guiyang - China	2824,62	10	19,50
Shimogou - Japão	2454,82	8	15,60

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

A quantidade de energia diária gerada pelos painéis fotovoltaicos considerando as perdas no sistema, pode ser obtida pela Equação (3),

$$E_{GP} = HSP_{max} \cdot A_{inst} \cdot E_f(1 - \rho), \quad (3)$$

onde  $A_{inst}$  é a área a ser instalada dos painéis fotovoltaicos,  $E_f$  é a eficiência do painel e  $\rho$  é a perda do sistema, que é considerado o valor de 20% (MIRANDA, 2014). Utilizando a Equação (3), pode-se obter os valores de energia diária gerada nos painéis fotovoltaicos e os mesmos podem ser visualizados na Tabela 9,

- Formiga – Brasil:

$$E_{GP} = 5,21 \cdot 11,7 \cdot 0,152(1 - 0,2) = 7,41 \text{ kWh/dia,}$$

- Guiyang – China:

$$E_{GP} = 3,12 \cdot 19,5 \cdot 0,152(1 - 0,2) = 7,39 \text{ kWh/dia,}$$

- Shimogou – Japão:

$$E_{GP} = 3,59 \cdot 15,6 \cdot 0,152(1 - 0,2) = 6,81 \text{ kWh/dia,}$$

- Göttingen – Alemanha:

$$E_{GP} = 2,72 \cdot 21,45 \cdot 0,152(1 - 0,2) = 7,09 \text{ kWh/dia.}$$

Tabela 9 - Comparação das quantidades de energia gerada com perdas para as cidades em questão.

Cidade - País	Quantidade de energia diária gerada com perdas (kWh/dia)
Formiga - Brasil	7,41
Göttingen - Alemanha	7,09
Guiyang - China	7,39
Shimogou - Japão	6,81

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Com os dados calculados no dimensionamento dos painéis fotovoltaicos, pode-se determinar o inversor de frequência a ser utilizado no sistema.

### 3.3 Dimensionamento do Inversor

Para dimensionar um inversor de frequência fotovoltaico, deve-se utilizar as seguintes expressões (SILVA E CALDAS, H. H., 2016),

$$V_{TS} = V_{oc} \cdot N_{PFV}, \quad (4)$$

$$V_{\Delta T} = V_{TS}(1 - \beta \Delta T), \quad (5)$$

$$I_{FV,max} = \frac{P_{TGerada}}{V_{\Delta T}}, \quad (6)$$

onde  $V_{TS}$  é a tensão total série do sistema,  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto do painel,  $N_{PFV}$  é o número de painéis fotovoltaicos,  $V_{\Delta T}$  é a tensão corrigida pelo efeito da temperatura,  $\beta$  é o coeficiente de temperatura da tensão igual a 2,3 mV/(célula.°C) (SILVA E CALDAS, H. H., 2016),  $\Delta T$  é a diferença de temperatura, onde a temperatura de operação utilizada será igual a 47°C, e a temperatura ambiente dependerá de cada localidade, cujos valores encontram-se nas Tabelas 3 e 4,  $I_{FV,max}$  é a corrente máxima de entrada no sistema e  $P_{TGerada}$  é a potência máxima gerada pelo sistema.

Com o auxílio das Equações (4), (5) e (6), é possível calcular os parâmetros de cada sistema, e que são sintetizados na Tabela 10, a fim de dimensionar o inversor adequado para cada situação:

- Formiga – Brasil:

$$V_{ts} = 45 \cdot 6 = 270 \text{ V},$$

Para a temperatura ambiente mensal mínima = 18°C (Julho):

$$V_{\Delta T} = 270 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 18) = 251,99 \text{ V},$$

$$I_{FV,max} = \frac{1691,52}{251,99} = 6,71 \text{ A},$$

Para a temperatura ambiente mensal máxima = 24°C (Fevereiro):

$$V_{\Delta T} = 270 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 24) = 255,72 \text{ V},$$

$$I_{FV,max} = \frac{1691,52}{255,72} = 6,61 \text{ A}.$$



- Guiyang – China:

$$V_{ts} = 45 \cdot 10 = 450 \text{ V},$$

Para a temperatura ambiente mensal mínima = 8°C (Janeiro):

$$V_{\Delta T} = 450 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 18) = 409,64 \text{ V},$$

$$I_{FV,max} = \frac{2824,62}{409,64} = 6,89 \text{ A},$$

Para a temperatura ambiente mensal máxima = 28°C (Julho):

$$V_{\Delta T} = 450 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 24) = 430,34 \text{ V},$$

$$I_{FV,max} = \frac{2824,62}{430,34} = 6,56 \text{ A}.$$

- Shimogou – Japão:

$$V_{ts} = 45 \cdot 8 = 360 \text{ V},$$

Para a temperatura ambiente mensal mínima = 1°C (Janeiro):

$$V_{\Delta T} = 360 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 1) = 321,91 \text{ V},$$

$$I_{FV,max} = \frac{2454,82}{321,91} = 7,63 \text{ A},$$

Para a temperatura ambiente mensal máxima = 24°C (Agosto):

$$V_{\Delta T} = 360 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 24) = 340,96 \text{ V},$$

$$I_{FV,max} = \frac{2454,82}{340,96} = 7,20 \text{ A.}$$

- Göttingen – Alemanha:

$$V_{ts} = 45 \cdot 11 = 495 \text{ V,}$$

Para a temperatura ambiente mensal mínima = 1°C (Janeiro e Fevereiro):

$$V_{\Delta T} = 495 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 1) = 442,63 \text{ V,}$$

$$I_{FV,max} = \frac{3240,00}{442,63} = 7,32 \text{ A,}$$

Para a temperatura ambiente mensal máxima = 18°C (Julho e Agosto):

$$V_{\Delta T} = 495 \cdot (1 - 0,0023 \cdot 18) = 461,98 \text{ V,}$$

$$I_{FV,max} = \frac{3240,00}{461,98} = 7,01 \text{ A.}$$

Tabela 10 - Parâmetros utilizados no dimensionamento do inversor.

Cidade - País	$P_{TGerada}$ (Wp)	$V_{Ts}$ (V)	Temperatura ambiente média mensal mínima		Temperatura ambiente mensal máxima	
			$V_{\Delta T}$ (V)	$I_{FV,max}$ (A)	$V_{\Delta T}$ (V)	$I_{FV,max}$ (A)
Formiga - Brasil	1691,52	270	251,99	6,71	255,72	6,61
Göttingen - Alemanha	3240,00	495	409,64	6,89	430,34	6,56
Guiyang - China	2824,62	450	321,91	7,63	340,96	7,20
Shimogou - Japão	2454,82	360	442,63	7,32	461,98	7,01

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Com os resultados da Tabela 10, pode-se definir que o inversor que atenderia todos os sistemas dimensionados, é o Inversor Solar *Grid-Tie* B&B Moso SF5000TL,

que de acordo com seu *datasheet* (PORTAL SOLAR, 2016), suporta **uma potência máxima de 5000 W, uma tensão máxima de 500 V e uma corrente máxima de entrada de 15 A.**

Por fim, com a apresentação da metodologia utilizada para o dimensionamento dos sistemas propostos para cada cidade, no próximo capítulo são apresentados os resultados e as discussões desta monografia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado um estudo comparativo entre os sistemas fotovoltaicos dimensionados na metodologia, para a mesma residência em quatro cidades distintas: Formiga (Brasil), Göttingen (Alemanha), Guiyang (China) e Shimogou (Japão). Para a realização do estudo comparativo considerou-se os seguintes parâmetros: irradiação solar, temperatura média para o dimensionamento do inversor, quantidade de painéis, energia produzida em cada sistema fotovoltaico e o custo de cada sistema.

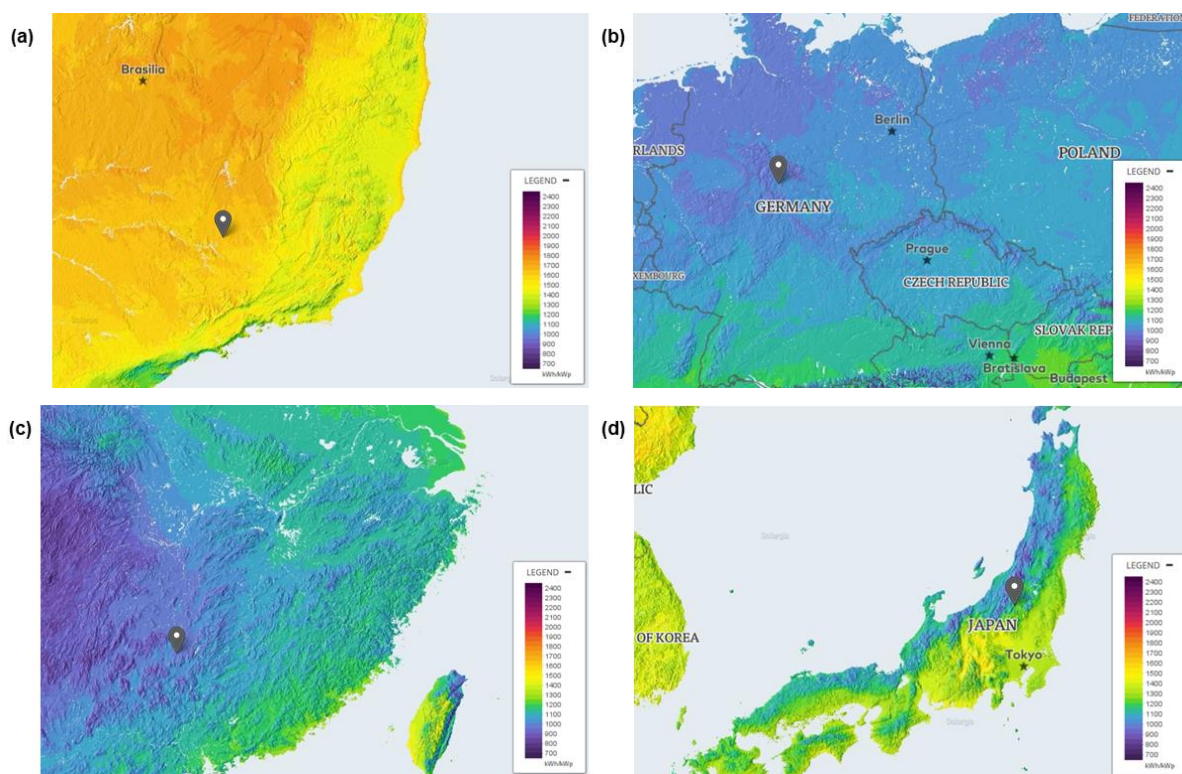


Figura 33 - Irradiação solar anual média das localidades selecionadas: (a) Formiga (Brasil); (b) Göttingen (Alemanha); (c) Guiyang (China) e (d) Shimogou (Japão).

Fonte: Figuras extraídas do *Software Global Solar Atlas* (<http://globalsolaratlas.info/>).

### 4.1. Irradiação Solar Anual Média e Temperatura média das Localidades Selecionadas

Após a seleção das cidades nos quatro diferentes países: Formiga (Brasil), Göttingen (Alemanha), Guiyang (China) e Shimogou (Japão), utilizou-se o *software online gratuito Global Solar Atlas* disponível no sítio <http://globalsolaratlas.info/>, para

visualizar a distribuição de irradiação solar anual média nas cidades e em suas respectivas regiões, conforme apresentado na Figura 33.

Analisando a Figura 33 e com os resultados apresentados na Tabela 5, pode-se verificar que a cidade de Formiga possui melhores características de irradiações solares que as demais cidades (nos países distintos): 1897,8 kWh/m<sup>2</sup>, seguido por Japão, China e Alemanha, com os valores 1314,3, 1138,1 e 993,1 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente.

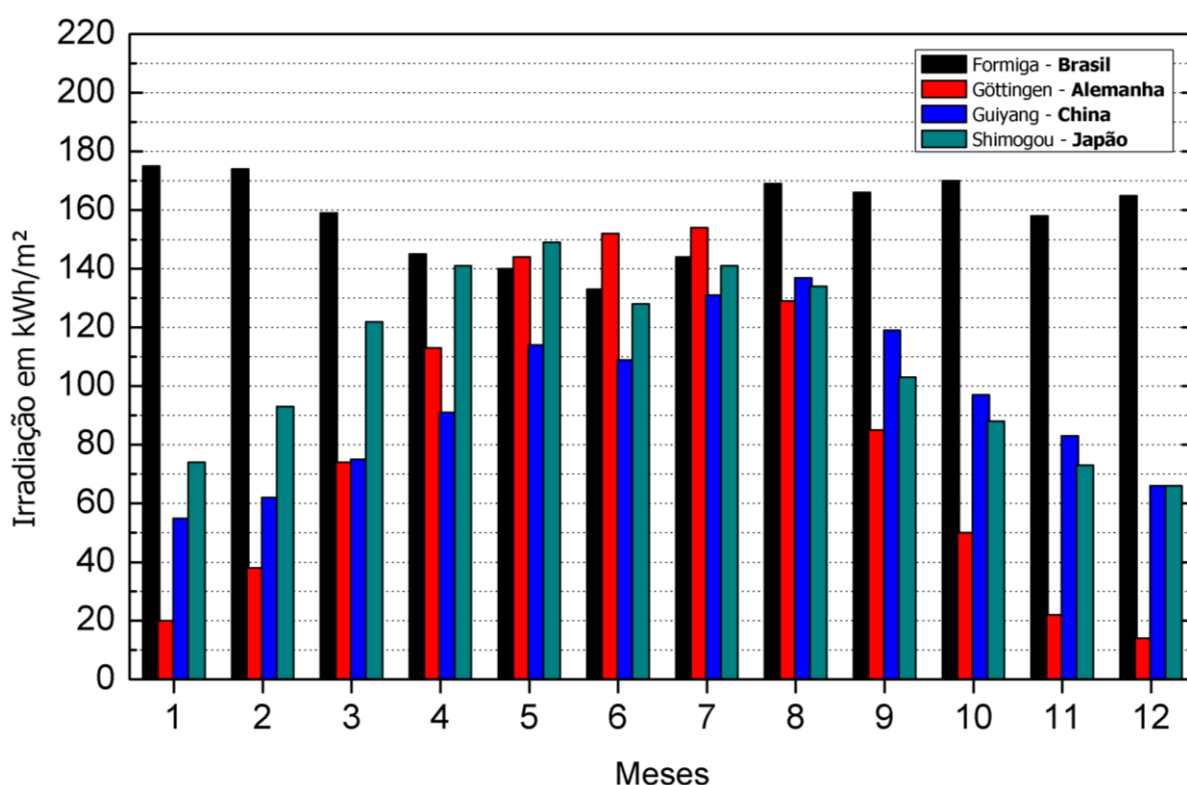


Figura 34 - Comparação entre a irradiação solar mensal média de cada localidade.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Na Figura 34, pode-se visualizar que a irradiação solar mensal média na cidade de Formiga (Brasil) é superior as demais localidades. Vale a pena ressaltar que mesmo no inverno (de junho a setembro) no hemisfério sul, a cidade de Formiga, apresenta um valor médio superior as demais localidades, considerando que as cidades se localizam no hemisfério norte e estão no verão (período de maior radiação solar),

- Formiga – Brasil:

Irradiação solar média no inverno =  $5,01 \text{ kWh/m}^2 \text{ por dia}$ .

- Guiyang – China:

Irradiação solar média no verão =  $4,06 \text{ kWh/m}^2 \text{ por dia}$ .

- Shimogou – Japão:

Irradiação solar média no verão =  $4,14 \text{ kWh/m}^2 \text{ por dia}$ .

- Göttingen – Alemanha:

Irradiação solar média no verão =  $4,26 \text{ kWh/m}^2 \text{ por dia}$ .

Assim como a irradiação, diante dos resultados extraídos anteriormente, foi confeccionado um gráfico comparativo entre as temperaturas médias mensais das cidades analisadas.

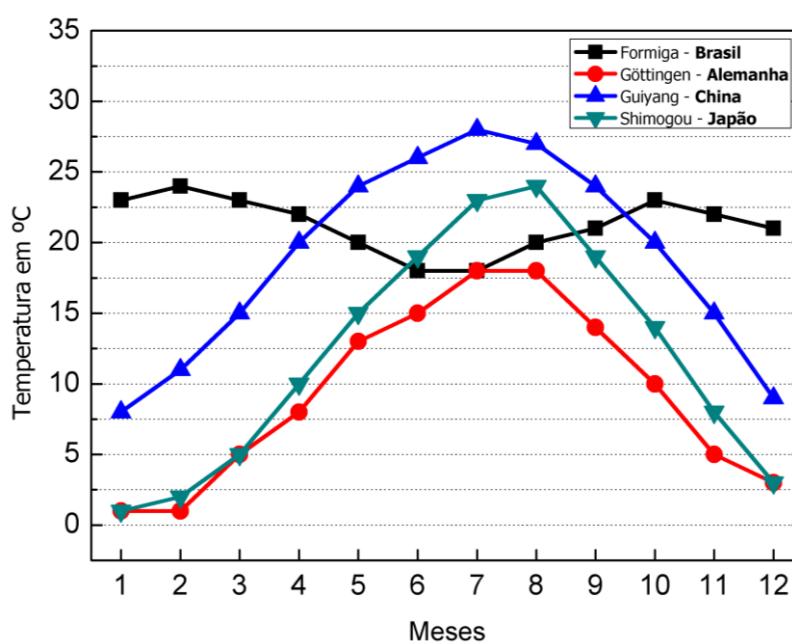


Figura 35 - Temperatura média mensal das diferentes localidades.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Visualizando a Figura 35 pode-se verificar que as cidades de Formiga e de Guiyang possuem temperatura médias semelhantes, pois apresentam valores médios de 21,2 °C e 19 °C, respectivamente, e que são superiores as cidades de Göttingen e Shimogou, 9,9 °C e 11,8 °C, os valores de temperatura média foram obtidos por meio dos valores apresentados nas Tabelas 3 e 4. Ressaltando que, os valores de temperatura mensal média, mínima e máxima, foram utilizados para dimensionar adequadamente o inversor para cada localidade, conforme apresentado na Tabela 10 da Seção 3.3.

Com as informações fornecidas sobre a irradiação solar mensal média e temperatura média de cada cidade/país, na próxima seção é apresentado o estudo comparativo dos sistemas fotovoltaicos instalados para cada residência em sua respectiva localidade.

#### 4.2. Estudo Comparativo dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Dimensionados

A partir dos cálculos efetuados no Capítulo 3, dimensionou-se o sistema fotovoltaico conectado à rede para a geração de energia solar fotovoltaica de uma residência. Os dados obtidos na metodologia são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede dimensionados da residência em questão para as diferentes localidades.

Parâmetros	Formiga (Brasil)	Göttingen (Alemanha)	Guiyang (China)	Shimogou (Japão)
Número de painéis fotovoltaicos	6	11	10	8
Área total ocupada pelos painéis (m <sup>2</sup> )	11,7	21,45	19,5	15,6
Massa total dos painéis (kg)	160,8	294,8	268,0	214,4
Energia diária gerada com perdas (kWh/dia)	7,41	7,09	7,39	6,81
Energia anual gerada com perdas (kWh/ano)	2704,65	2587,85	2697,53	2485,65
Potência total do conjunto fotovoltaico (Wp)	1691,52	3240,00	2824,62	2454,82

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Analisando a Tabela 11, pode-se verificar que para a cidade de Formiga, é necessário um sistema fotovoltaico composto por seis painéis fotovoltaicos, valor

menor que as demais cidades. Com isso, pode-se concluir que para Formiga, a área do sistema fotovoltaico a ser instalado é menor que as demais localidades, assim como tem-se uma redução na quantidade de massa devido a quantidade de painéis reduzida, em comparação as demais cidades/países.

Com os dados apresentados na Tabela 11, pode-se visualizar a quantidade de energia gerada anual com perdas para cada sistema dimensionado. Na Figura 36 pode-se visualizar a comparação da geração de energia anual considerando as perdas do sistema.

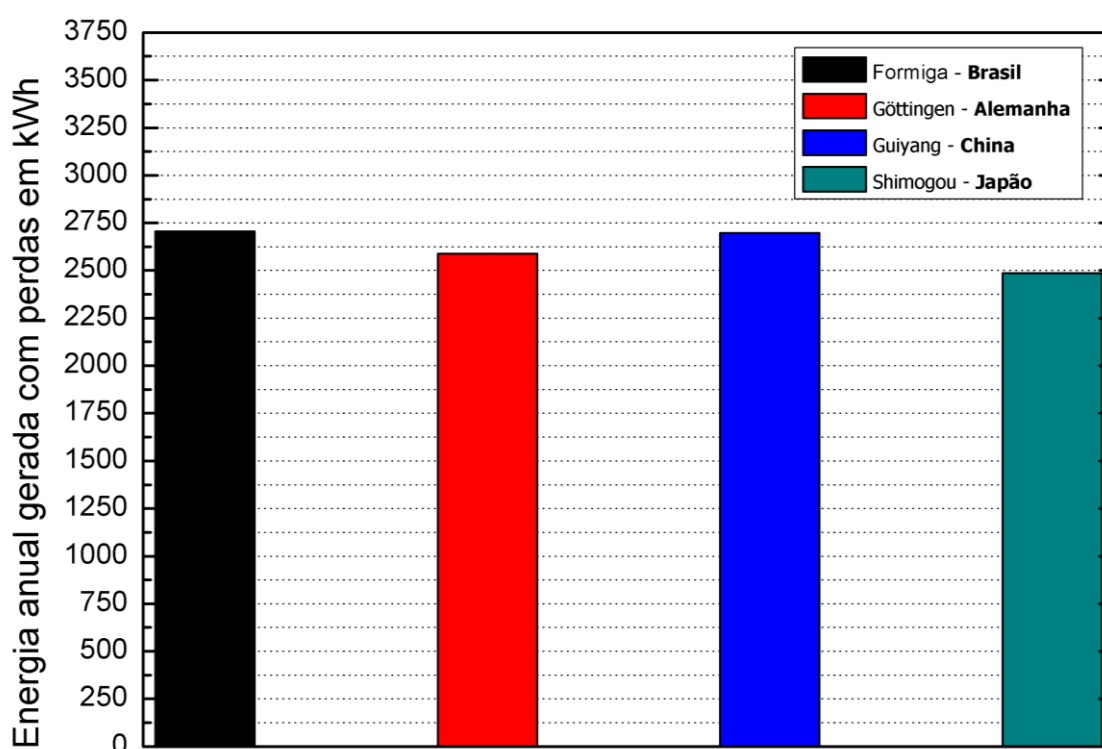


Figura 36 - Energia anual gerada com perdas para cada localidade.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Devido a fatores naturais favoráveis, já mencionados anteriormente, percebe-se que, embora o número de painéis instalados na residência da cidade de Formiga seja menor que os demais, este sistema ainda assim, consegue gerar maior energia que as demais cidades, evidenciando assim o potencial solar da região central do estado de Minas Gerais.



### 4.3. Custo dos Sistemas Fotovoltaicos Dimensionados

Como os sistemas fotovoltaicos são dimensionados para diferentes cidades/países, onde cada região possui normas técnicas de instalação distintas, o que pode influenciar diretamente no custo dos sistemas, considerou-se apenas os valores dos módulos (painéis) fotovoltaicos e do inversor de frequência dimensionado.

O preço utilizado para o cálculo foi baseado nos preços médios encontrados no sítio eletrônico de vendas online <https://www.mercadolivre.com.br/>, onde o custo médio de cada módulo fotovoltaico foi de R\$ 1.446,40, enquanto que o valor do inversor utilizado foi de R\$ 7.000,00. Conhecendo-se os valores individuais dos componentes utilizados, confeccionou-se a Tabela 13, obtendo assim o custo total de cada sistema fotovoltaico dimensionado.

Tabela 12 - Custo do sistema, considerando módulos fotovoltaicos e inversor de frequência para cada localidade.

Cidade - País	Custo do sistema em R\$
Formiga - Brasil	15.678,40
Göttingen - Alemanha	22.910,40
Guiyang - China	21.464,00
Shimogou - Japão	18.571,20

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Considerando que não estão sendo levado em conta os valores de instalação completa do sistema em cada localidade, pode-se concluir que o custo de aquisição do sistema fotovoltaico dimensionado com painéis fotovoltaicos e inversor de frequência, é menor para a cidade de Formiga/MG em relação as demais cidades/países. Com forma de comparação, **o custo do sistema fotovoltaico desenvolvido para Formiga/MG é 31,5% menor que o sistema em Göttingen (Alemanha), 26,9% menor que o sistema em Guiyang (China) e 15,6% menor que o sistema em Shimogou (Japão).**

Tais resultados evidenciam que, o sistema desenvolvido para Formiga apresentou seis painéis fotovoltaicos, e mesmo assim o potencial de geração de

energia elétrica apresentada na cidade mineira foi superior as demais localidades: Göttingen (Alemanha) com 11 painéis, Guiyang (China) com 10 e Shimogou (Japão) com 8 painéis, conforme gráfico apresentado na Figura 36.

Pode-se concluir também que a cidade de Formiga possui um potencial solar fotovoltaico superior as demais cidades analisadas, levando em conta os parâmetros de comparação considerados neste trabalho. Lembrando que os países escolhidos são os líderes mundiais na produção de energia solar fotovoltaica.

Este trabalho de conclusão de curso contribuiu no sentido de **apontar um cenário ideal para o desenvolvimento de políticas de incentivo e, principalmente de popularização da geração de energia fotovoltaica**, considerando que a cidade de Formiga se encontra em uma região de radiação solar privilegiada, assim como o restante do país.

De forma geral, ainda há muito o que progredir para que o Brasil consiga ocupar um lugar entre os líderes de geração fotovoltaica no mundo, principalmente em relação a incentivos fiscais, políticos, pesquisas e conscientização da população sobre os benefícios dessa fonte de energia, bem como gerar subsídios para as unidades consumidoras residenciais possam ter acesso a este tipo de energia (NASCIMENTO, 2017).

## 5 CONCLUSÕES

Tendo em vista os diversos problemas causados pelo uso de combustíveis fósseis e um possível esgotamento dessas fontes de energia, as energias renováveis são vistas como uma alternativa promissora para diversificar a matriz energética mundial.

Dentre as diversas fontes energéticas alternativas existentes no mundo de hoje, a utilização da energia proveniente do sol como fonte de geração de energia elétrica oferece diversos benefícios, tanto no âmbito elétrico, quanto ambiental e socioeconômico sendo uma tendência mundial, onde nos próximos anos representará a maior parte da composição da matriz energética mundial.

A energia solar fotovoltaica baseia-se na conversão direta da radiação solar em energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico quando a mesma é incidida nos módulos fotovoltaicos, que são compostas por materiais semicondutores. No processo de conversão as células (módulos) geram tensão contínua, tornando necessário a utilização de um inversor para converter em tensão alternada possibilitando melhores proveitos da energia gerada nas unidades consumidoras em questão.

De posse das informações apresentadas neste trabalho, pode-se verificar que o Brasil é um país que apresenta um grande potencial de geração fotovoltaica, especialmente o Estado de Minas Gerais. Entretanto, mesmo com condições favoráveis à produção de energia fotovoltaica, o Brasil ainda não figura entre os países líderes mundiais em capacidade fotovoltaica: China, Alemanha e Japão. Ressaltando ainda que os líderes apresentam níveis de irradiação solar inferior ao Brasil, porém apresentam diversas políticas de popularização da energia solar fotovoltaica (NASCIMENTO, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho realizou um estudo comparativo do potencial solar fotovoltaico da cidade de Formiga/MG, com três cidades localizadas nos três líderes mundiais de geração fotovoltaica: Guiyang (China), Shimogou (Japão) e Göttingen (Alemanha). Baseado em informações obtidas sobre a irradiação solar média das cidades analisadas de cada país mencionado, realizou-se o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede para uma mesma residência com demanda média de 170 kWh/mês.

De posse dos resultados obtidos por meio dos dimensionamentos, pode-se verificar que o sistema desenvolvido para a cidade de Formiga/MG, apresentou os melhores valores de irradiação solar anual, acarretando assim em um sistema fotovoltaico com um número de painéis fotovoltaicos inferiores as demais, e mesmo assim, apresentou um valor maior de energia fotovoltaica gerada ao longo do ano, quando comparado as outras cidades elencadas. Ressaltando que foram utilizados os valores de temperatura média máxima e mínima em cada localidade para dimensionar adequadamente o inversor de cada sistema.

Por fim, pode-se evidenciar o grande potencial fotovoltaico do Brasil, especialmente o estado de Minas Gerais, que diante de melhores incentivos fiscais e políticas governamentais, poderia tornar-se uma referência mundial na capacidade de energia fotovoltaica instalada.

### **5.1. Trabalhos Futuros**

A seguir, são apresentadas sugestões de futuros trabalhos:

- Desenvolver uma análise econômica multi-índices dos sistemas desenvolvidos neste trabalho;
- Aplicar outros métodos de dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos;
- Implementar um sistema fotovoltaico desconectado da rede para a unidade consumidora utilizada neste trabalho, bem como as cidades analisadas;
- Dimensionar uma fazenda solar nas regiões estudadas afim de estudar as suas características técnico-financeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASIA EUROPE CLEAN ENERGY (SOLAR) ADVISORY CO. Ltd.. Disponível em: <<http://www.aecea.com.de/>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. **Agência Brasileira de Energia Elétrica - ANEEL**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

ATLAS SOLARIMETRO DE MINAS GERAIS. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/ptbr/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/atlas\\_solarimetrico.pdf](http://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas_solarimetrico.pdf)>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Energy Technology Perspectives 2016**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2016ExecutiveSummaryPortugueseVersion1.pdf>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

ARAUJO, C. N. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (Pós-Graduação). Universidade Federal de Lavras - UFLA, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Energia solar fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/10184/15266087/painel+3+ap+7+2017.10.19+ABSOLAR++Energia+Solar+Fotovoltaica++Dr.+Rodrigo+Lopes+Sauaia.pdf/54f8b161-751b-0639-bd04-77a60cac45c3>>. Acesso em: 04 de maio de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Geração distribuída solar fotovoltaica**. Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE. Rio de Janeiro, 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

Bundesnetzagentur. Disponível em: <[https://www.bundesnetzagentur.de/cln\\_132/DE/Home/home\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/cln_132/DE/Home/home_node.html)>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

CASTRO, N.; MARTINI, S.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G., TIMPONI, R. **A importância das fontes alternativas e renováveis na evolução da matriz elétrica**

**brasileira.** In: V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável. Fundación Mapfre, 2009.

CASTRO, R. M. **INTRODUÇÃO À ENERGIA FOTOVOLTAICA.** Disponível em: <[http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/Introducao\\_a\\_Energia\\_Fotovoltaica.pdf](http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/Introducao_a_Energia_Fotovoltaica.pdf)>. Acesso em: 14 de abril de 2018.

CUNHA, José Luiz De Paula Alves da. **Eletrificação de edificações rurais isoladas utilizando energia solar fotovoltaica.** 2006. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Lavras.

CHE, H. Z., Shi, G. Y., ZHANG, X. Y., ARIMOTO, R., ZHAO, J. Q., XU, L., WANG, B., CHEN, Z. H. (2005), **Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000**, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06803.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 4 de maio de 2018.

CRESESB. **Tutorial de energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=tutorial\\_solar](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_solar)>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

COOPER, Ellison; JUNIOR, Martins; MORALLES, W. **Aplicação de painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora complementar de energia elétrica em residências.** Trabalho de Conclusão de Curso, Setor de Tecnologia–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

EOA. **Japão é o 3º maior mercado de energia solar.** Disponível em: <<http://ecoa.org.br/japao-e-o-3o-maior-mercado-de-energia-solar/>>. Acesso em: 11 de abril de 2018.

EDF ENERGY: GAS & ELECTRICITY SUPPLIERS FOR HOME & BUSINESS. **Pirapora.** Disponível em: <<https://www.edf-energies-nouvelles.com/project/pirapora/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

ECYCLE. **O que é energia solar, vantagens e desvantagens.** Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2890-energia-solar>>. Acesso em: 14 de maio de 2018.

Eletrônica sem limites. **Diodos.** Disponível em: <<http://eletronicasemlimites.blogspot.com/2013/07/diodos.html>>. Acesso em: 05 de abril de 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo mensal de energia elétrica por classe e regiões no Brasil de 2004 a 2018.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>>. Acesso em: 11 de maio de 2018.

FERREIRA, R. M. **Estudo de Viabilidade Econômica ara Implantação de Geração Fotovoltaica em Escola Municipal de Abaeté**. Disponível em: <<https://www.formiga.ifmg.edu.br/documents/2017/PublicacoesTCCsBiblioteca/EE/Estudo-de-Viabilidade-Economica-Para-Implantao-de-Gerao-Fotovoltaica-em-Escola-Municipal-de-Abaet-MG---Rasa-Micaelle-Ferreira.pdf>>. Acesso em: 20 de abril de 2018.

FIGUEIRA, Fabio Fernandes. **Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede para Alimentar a Sala de Computação da Escola Municipal Tenente Antônio João**. Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.

IFSC. **AULA 1 – Eletrônica Geral 1 – Técnico**. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_1\\_-\\_Eletr%C3%B4nica\\_Geral\\_1\\_-\\_T%C3%A9cnico](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_1_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico)>. Acesso em: 07 de março de 2018.

IFSC. **AULA 2 – Eletrônica Geral 1 – Técnico**. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_2\\_-\\_Eletr%C3%B4nica\\_Geral\\_1\\_-\\_T%C3%A9cnico](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico)>. Acesso em: 07 de março de 2018.

G1. **Aneel anuncia bandeira vermelha e taxa extra de R\$ 3,50 nas contas de luz em outubro**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/aneel-anuncia-bandeira-vermelha-e-taxa-extra-de-r-350-nas-contas-de-luz-em-outubro.ghtml>>. Acesso em: 09 de maio de 2018.

HANNE, Petra. **Alemanha: novas instalações fotovoltaicas – 7 de junho de 2017**. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/alemanha-novas-instala%C3%A7%C3%B5es-fotovoltaicas-atingem-131-mw-botteon>>. Acesso em: 07 de março de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas brasileiro de energia solar**. Disponível em: <[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf)>. Acesso em: 07 de maio de 2018.

MARTINS JÚNIOR; LOPES JÚNIOR; SILVA JÚNIOR. **Potencial de Geração de Energia Solar: O Brasil e o Mundo**. 14<sup>o</sup> Congresso Nacional de Meio Ambiente, 2017

M. JÚNIOR, Alcy et al. Análise de viabilidade econômica de sistema fotovoltaico conectado à rede em prédios públicos: Um estudo de caso comparativo nos estados de Goiás e Tocantins. **XIV CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, Uberlândia, v. 2016, n. 1, p.1-6, 07 out. 2016. Anual. Disponível em: <[http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos/ceel2016\\_artigo165\\_r01.pdf](http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos/ceel2016_artigo165_r01.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2018.

MELO, N. R. **Dimensionamento e simulação de uma microrrede em um condomínio residencial utilizando geração eólica e solar**. 2016. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e



Tecnologia de Minas Gerais - IFMG. Formiga, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim mensal de monitoramento do setor elétrico – março de 2018**. Brasília: MME, 2018.

MIRANDA, A. B. C. M. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. 2014. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas – março de 2017**. Estudo técnico – Recursos Minerais, Hídricos e Energéticos. Consultoria Legislativa, 2017

NORDEN SOLAR. **Potencial brasileiro de geração de energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<http://nordensolar.com.br/potencial-brasileiro-de-geracao-de-energia-solar-fotovoltaica/>>. Acesso em: 07 de maio de 2018.

PERLOTTI, E.; *et al.*, **Proposta para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**. 2012. 176 f. (Relatório Técnico) - Estudo do Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da Abinee, LCA Consultores, PSR Soluções e Consultoria em Energia.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2014.

PNUMA. **Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**. Disponível em: <[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9851/UNEP\\_2030\\_agenda\\_PT.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9851/UNEP_2030_agenda_PT.pdf?sequence=4&isAllowed=y)>. Acesso em: 07 de março de 2018.

PORTAL SOLAR. **Energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

PORTO SOLAR BRASIL. **A Porto Solar Brasil**. Disponível em: <<https://www.portosolarbrasil.com.br/quem-somos>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

REAL-SOLAR. **SOLAR PV**. Disponível em: <<https://www.real-solar.com/pv>>Acesso em: 13 de maio de 2018.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK (REN21). **Renewables 2016 Global Status Report**. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR\\_2016\\_Full\\_Report\\_lowres.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf)>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

RENEWABLE ENERGY WORLD. **Solar PV in China Looks Promising for 2018**. Disponível em: <<https://www.renewableenergyworld.com/articles/2018/03/solar-pv-in-china-looks-promising-for-2018.html>>. Acesso em: 05 de abril de 2018.

RESEARCHGATE. **Características de conexão das células no modulo FV**. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/figure/Figura-33-Characterísticas-de>>

conexao-das-celulas-no-modulo-FV\_fig26\_305651683> Acesso em: 08 de março de 2018.

RODRIGUES, Isabel Sampaio. **Geração distribuída no setor de energia elétrica no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Economia. Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro (RJ), 2016.

ROSA, Antonio Robson Oliveira da; GASPARIN, Fabiano Perin. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

SEED. **Doping – Tipos de Doping – Dopagem Química de Materiais – Como Ocorre a Dopagem em Semicondutores**. Disponível em: <<http://www.quimica.seed.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=17>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

SETOR ENERGÉTICO. **IEEFA lança relatório com nove estudos de caso de mercados em transição para as energias eólica e solar**. Disponível em: <<http://www.setorenergetico.com.br/energia/ieefa-lanca-relatorio-com-nove-estudos-de-caso-de-mercados-em-transicao-para-as-energias-eolica-e-solar/25319/>>. Acesso em: 05 de março de 2018.

SILVA, Rayssa Guimarães; CARMO, Marlon José do. **Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética**. InterSciencePlace, v. 12, n. 2, 2017.

SILVA, Rayssa Guimarães; CARMO, Marlon José do. **Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética**. InterSciencePlace, v. 12, n. 2, 2017.

SILVA E CALDAS, H. H. Geração Fotovoltaica Distribuída: **Estudo de Caso para Consumidores Residenciais de Salvador** – Ba. 2016. 58 f. Artigo (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia- IFBA. Bahia, 2016.

SUN VOLT. Disponível em: <<http://www.sunvoltenergiasolar.com.br/capacidade-solar-mundial-cresce-quase-50-em-2016-total-chega-a-305-gw/>>. Acesso em: 29 de março de 2018.

THE GUARDIAN. **China Builds World's Biggest Solar Farm in Journey to Become Green Superpower**. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2017/jan/19/china-builds-worlds-biggest-solar-farm-in-journey-to-become-green-superpower>> Acesso em: 29 de março de 2018.

UNICAMP. **Estudo da banda de gap em componentes eletrônicos semicondutores**. Disponível em: <[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2003/993963Luis\\_Tessler\\_f809\\_RF09\\_0.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/993963Luis_Tessler_f809_RF09_0.pdf)>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica - conceitos e aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2013.

WORLD ENERGY. **World Energy Resources 2016**. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

YINGLI SOLAR. **Multi Crystal Line**. Disponível em: <<http://www.yinglisolar.com/br/products/multicrystalline/>>. Acesso em: 13 de maio de 2018.