

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS – CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CORINA FONSECA DE CARVALHO MACEDO

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL CONECTADO À REDE
ELÉTRICA EM ARCOS - MG

FORMIGA – MG

2017

CORINA FONSECA DE CARVALHO MACEDO

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL CONECTADO À REDE
ELÉTRICA EM ARCOS - MG**

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 Vinícius Tayette da Nobrega

FORMIGA – MG

2017

CORINA FONSECA DE CARVALHO MACEDO

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL CONECTADO À REDE
ELÉTRICA EM ARCOS - MG**

Avaliado em ____ de _____ de ____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Rafael Vinícius Tayette da Nobrega

Prof. Msc. Ana Paula Lima dos Santos

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Formiga, 21 de junho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, meu protetor e maior responsável por essa conquista, por não permitir que eu desistisse diante das dificuldades, me proporcionando sempre fé e superação perante os obstáculos que vieram ao meu encontro.

Ao meu orientador, Rafael Vinícius Tayette da Nobrega, exemplo de profissionalismo, pela paciência e sabedoria em me auxiliar neste trabalho, estando sempre presente em quaisquer dúvidas.

Aos professores do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – campus Formiga, os quais me fizeram encantar pela Engenharia Elétrica, engrandecendo com ensinamentos sábios, dedicação e comprometimento com os alunos.

À minha família, pelas inúmeras orações e apoio incondicional. Aos meus pais, Julieta e Davi, pelo exemplo de vida, incentivadores desse sonho e pela prontidão em me ajudar durante toda essa caminhada. Aos meus irmãos Gisele e Daniel, pelo amor e carinho. Vocês são a razão pela qual eu me esforcei tanto, obrigada por tudo!

Aos meus amigos, em especial ao “Quarteto Fantástico”, pela amizade sincera e momentos de descontração durante os cinco anos de curso, pelas noites trocadas por estudos, pelos trabalhos em grupo, pelo companheirismo e apoio de cada uma das meninas. Vocês foram e serão fundamentais em minha vida!

Enfim, obrigada a todos aqueles que, direta ou indiretamente, participaram desse momento em minha vida e compartilham comigo essa vitória.

*“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”*

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

O sistema solar fotovoltaico conectado à rede (*On-Grid*) funciona de forma sincronizada com a rede de distribuição de energia elétrica, conforme o sistema de compensação da normativa ANEEL 687/2015. No Brasil, existem alguns fatores que têm contribuído para uma maior inserção das energias renováveis no sistema elétrico, podendo-se destacar, o crescimento populacional, com o conseqüente aumento de demanda, o alto custo da conta de energia e os consumidores residenciais afastados da rede elétrica pública. Dessa forma, no presente trabalho, foi realizado um estudo de dimensionamento de um sistema fotovoltaico que atenda a demanda de consumidores residenciais da região central da cidade de Arcos - MG. O principal objetivo foi analisar a viabilidade econômica desse dimensionamento, visando uma redução de custos aos consumidores, bem como uma diminuição da dependência de energia elétrica proveniente da distribuidora. Para essa análise, foram avaliados os valores de irradiância solar, os cálculos de dimensionamento dos equipamentos e o investimento total gasto nesse sistema. A energia gerada pelo sistema ainda foi submetida a uma comparação, considerando ou não as perdas do sistema. Dessa forma, o *payback* (tempo de retorno de investimento) do sistema proposto foi satisfatório, em torno de 11 anos para a análise do sistema mais real (com perdas), em comparação com a vida útil dos painéis fotovoltaicos (em torno de 25 anos). Por fim, tem-se um sistema fotovoltaico residencial que implica em economia de custos na conta de luz das unidades consumidoras de Arcos - MG, culminando assim na viabilidade econômica do sistema proposto.

Palavras-Chave: Sistemas fotovoltaicos, *On-Grid*, Consumo elétrico, Dimensionamento elétrico, Fontes renováveis.

ABSTRACT

The photovoltaic solar system connected to the grid (On-Grid) operates in a synchronized way with an electricity distribution network, according to the compensation system of the ANEEL 687/2015 standard. In Brazil, there are some factors that contributed to a greater insertion of the renewable energies in the electric system, being possible to emphasize, the population growth, with the consequent increase of the demand, the high cost of energy and the residential consumers away from the electrical network public. Thus, in the present work, a study was carried out on the design of a photovoltaic system that meets the demand of residential consumers of the central region of the city of Arcos - MG. The main objective was to analyze the economic feasibility of this design, aiming at a reduction of costs to the consumers, as well as a reduction of the dependence of electric energy coming from the distributor. For this analysis, the values of solar irradiance, equipment design calculations and the total investment spent in this system were evaluated. The energy generated by the system was still submitted to a comparison, considering or not the losses of the system. In this way, the payback (time of return of investment) of the proposed system was satisfactory, around 11 years for the analysis of the most real system (with losses), compared to the useful life of the photovoltaic panels (around 25 years). Finally, there is a residential photovoltaic system that implies cost savings in the light bill of the consumer units of Arcos - MG, culminating in the economic viability of the proposed system.

Keywords: Photovoltaic systems, On-grid, Electrical consumption, Electrical sizing, Renewable sources.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Potência de pico do sistema fotovoltaico.....	43
Equação 2 - Número de painéis fotovoltaicos.....	44
Equação 3 - Energia diária gerada sem perdas.....	46
Equação 4 - Energia diária gerada com perdas.....	46
Equação 5 - Tensão total série dos painéis.....	47
Equação 6 - Tensão corrigida pelo efeito da temperatura.....	48
Equação 7 - Corrente máxima de entrada.....	48
Equação 8 - Performance de rendimento.....	50
Equação 9 - Tempo de retorno.....	53
Equação 10 - Valor da energia gerada durante o ano.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2016.....	13
Figura 2 - Nível de armazenamento do sistema Cantareira, mostrando a evolução de 2010 a 2015.....	14
Figura 3 - Arranjo fotovoltaico instalado em uma residência.....	21
Figura 4 - Evolução da potência solar instalada no mundo, entre os anos de 2010 e 2014.....	22
Figura 5 - Maiores potências instaladas por país, no ano de 2014.....	22
Figura 6 - Radiação solar no território brasileiro.....	24
Figura 7 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.....	25
Figura 8 - Painéis fotovoltaicos agrupados na configuração série.....	26
Figura 9 - Painéis fotovoltaicos agrupados na configuração paralelo.....	27
Figura 10 - Movimento aparente do sol durante o verão e o inverno.....	29
Figura 11 - Funcionamento do sistema fotovoltaico <i>On-Grid</i>	32
Figura 12 - Funcionamento do sistema fotovoltaico <i>Off-Grid</i>	34
Figura 13 - Irradiação solar média na cidade de Bambuí - MG.....	42
Figura 14 - Irradiação solar média na cidade de Oliveira - MG.....	42
Figura 15 - Gráfico realizado no <i>software</i> Excel, simulação da potência utilizando dez painéis fotovoltaicos em função dos anos de funcionamento dos painéis.....	45
Figura 16 - Gráfico realizado no <i>software</i> Excel, simulação da potência utilizando onze painéis fotovoltaicos em função dos anos de funcionamento dos painéis.....	45
Figura 17 - Geração mensal de energia estimada para o sistema fotovoltaico proposto.....	50
Figura 18 - Comparativo de <i>payback</i> entre as energias com e sem perdas do sistema.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo médio das unidades consumidoras da região central de Arcos - MG.....	41
Tabela 2 – Dados elétricos do módulo fotovoltaico.....	44
Tabela 3 – Dados finais do dimensionamento proposto.....	47
Tabela 4 – Dimensionamento do inversor fotovoltaico.....	49
Tabela 5 – Resultados da simulação.....	49
Tabela 6 – Levantamento de custo, de acordo com a porcentagem em relação ao valor do sistema.....	52
Tabela 7 – Estimativa do custo total do sistema solar fotovoltaico.....	53
Tabela 8 – Projeção de <i>payback</i> para a energia gerada, sem considerar as perdas do sistema.....	56
Tabela 9 – Projeção de <i>payback</i> para a energia gerada, considerando as perdas do sistema.....	57

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problema	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Hipótese.....	16
1.4	Objetivo Geral	17
1.5	Objetivos Específicos	17
1.6	Organização do Texto	18
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Energia Alternativa	19
2.2	Energia Solar Fotovoltaica	20
2.3	Efeito Fotovoltaico	24
2.3.1	Células Fotovoltaicas	25
2.3.2	Módulos Fotovoltaicos	26
2.3.2.1	Orientação dos Painéis Fotovoltaicos	28
2.3.3	Inversores	30
2.3.4	Medidor Bidirecional	30
2.4	Sistemas Fotovoltaicos	31
2.4.1	Sistemas <i>On-Grid</i> (<i>Grid-Tie</i>).....	32
2.4.2	Sistemas <i>Off-Grid</i>	33
2.4.2.1	Baterias	34
2.4.2.2	Controlador de Carga.....	35
2.5	Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL	36
3.	METODOLOGIA DESENVOLVIDA	40
3.1	Projeto do Sistema Fotovoltaico <i>On-Grid</i>	40
3.2	Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos	43

3.3	Dimensionamento do Inversor	47
3.4	Performance de Rendimento	50
4.	RESULTADOS	52
4.1	Pesquisa para Estimativa de Custo.....	52
4.2	Investimento Total do Sistema Fotovoltaico.....	53
5.	CONCLUSÕES.....	59
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	61
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Desde as primeiras crises energéticas, em 1970, a população começou a se precaver com o próprio suprimento energético futuro, diante de uma possível escassez de combustíveis fósseis. Considerando que essa fonte de energia representa 87% da matriz energética mundial, o tempo de esgotamento das reservas de petróleo se torna uma preocupação constante (RIBEIRO, U. G. V., 2012).

Assim, para impedir a existência de novas crises, faz-se necessário uma busca de fontes de energia que sejam limpas e renováveis. Essa procura é liderada por países como a China, Alemanha, EUA, Espanha, Índia e Portugal. Além disso, diversos aspectos ambientais, como o aquecimento global e a chuva ácida, sugerem a necessidade de uma independência das fontes fósseis as quais, além de serem agressivas ao meio ambiente, são fontes finitas de energia (RIBEIRO, U. G. V., 2012).

Atualmente, o sistema elétrico brasileiro possui uma determinada subordinação às hidrelétricas, quando se diz respeito à geração de energia elétrica. Essas usinas são responsáveis por, aproximadamente, 64% da produção de energia, conforme pode ser visualizado na Figura 1. No entanto, a disponibilidade da água pode findar-se e, conseqüentemente, a geração de energia no país ficar prejudicada. Dessa forma, as fontes de energia renováveis são alternativas viáveis e garantem uma maior segurança no fornecimento de energia elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

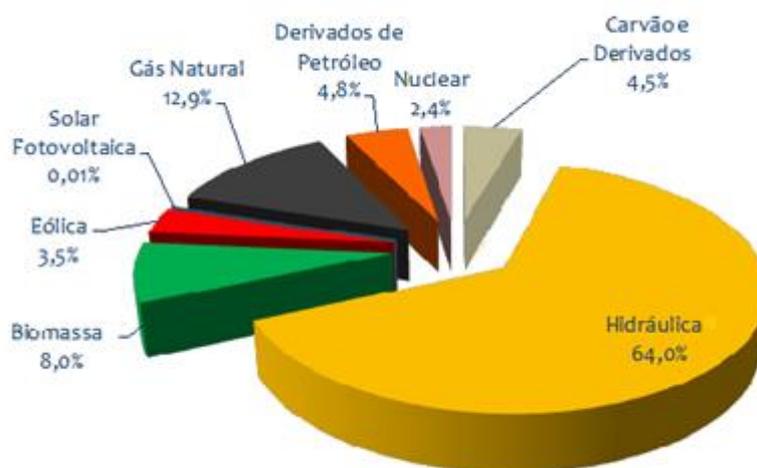


Figura 1 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2016.

Fonte: (FERRAZ, 2016).

Dessa forma, a insuficiência dos recursos hídricos no Brasil é um fator preocupante, uma vez que as chuvas no país têm diminuído de forma severa e, nos últimos anos, o país enfrentou uma das maiores crises hídricas da história. O Sistema Cantareira, um dos maiores sistemas do mundo destinado a captação e tratamento de água, sofreu com essa crise. Esse sistema abrange 12 municípios do estado de São Paulo e possui uma capacidade total de 1,165 trilhão de litros de água. A Figura 2 mostra um processo decrescente em nível de armazenamento de água, o qual obteve uma significativa decadência em 2014 e, no ano seguinte, uma redução equivalente a 9,3% da capacidade total (MELO, N. R., 2016).



Figura 2 - Nível de armazenamento do sistema Cantareira, mostrando a evolução de 2010 a 2015.

Fonte: (MELO, N. R., 2016).

Assim, a matriz energética nacional atual requer modificações, sendo que, até 2040, espera-se reduzir a construção de novas hidrelétricas e diminuir a utilização das usinas nucleares, as quais deterioram o meio ambiente. Segundo as pesquisas atuais, o vento, o sol e a biomassa, são apontados como as melhores fontes alternativas, por serem economicamente viáveis e quase não possuem impactos ambientais (MELO, N. R., 2016).

No Brasil, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem 26 usinas solares fotovoltaicas com capacidade de 25.263 megawatts (MW), o que corresponde a 0,02% da matriz energética nacional. A energia solar fotovoltaica ainda não é tão utilizada no país devido, principalmente, a ausência de indústrias nacionais para

fabricação dos módulos necessários e a falta de incentivo à geração solar por parte do governo (SILVA E CALDAS, H. H., 2016).

Com isso, neste trabalho é utilizada a energia solar para conversão fotovoltaica de energia elétrica. Este tipo de geração se dá por meio de células fotovoltaicas responsáveis por essa conversão, a qual possui características que fazem dessa a melhor opção para o abastecimento das unidades consumidoras. Além disso, os sistemas fotovoltaicos promovem a redução de custos importantes, propiciando assim, aplicações como na geração distribuída, já que compete com as altas tarifas cobradas pelas concessionárias (RIBEIRO, U. G. V., 2012).

1.1 Problema

A utilização de um sistema fotovoltaico na geração de energia elétrica é considerada uma solução para alguns dos problemas que o Brasil vem enfrentando, podendo-se destacar, o crescimento populacional, com o conseqüente aumento de demanda, o alto custo da conta de energia elétrica e os consumidores residenciais afastados da rede de distribuição pública.

O consumo de energia elétrica do país tende a triplicar até 2050, alcançando 1.624 *terawatt-hora* (TWh) (PAC - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). Dessa forma, esse aumento de demanda energética faz com que novos investimentos sejam realizados, visto que utilizando somente as fontes tradicionalmente exploradas, como hidrelétricas e termelétricas, essa demanda não seria atendida. Sendo assim, sistemas que empregam fontes alternativas para a geração de eletricidade, como a energia solar, tornam-se cada vez mais interessantes.

Outro problema enfrentado pela população está relacionado com o aumento da conta de energia elétrica dos consumidores. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a bandeira vermelha permanece na conta de luz, o que significa a imposição de uma cobrança de R\$ 4,50 a cada 100 *quilowatts* (kW) consumidos (G1 – SÃO CARLOS E ARARAQUARA, 2015). Esse é um fator complicado tanto para as indústrias, que além de pagar mais caro, acarreta desempregos; quanto para as famílias, que devem arcar com mais despesas de impostos, pagando por uma energia não consumida. Assim, métodos vinculados à rede pública de energia elétrica, como a instalação de módulos fotovoltaicos, oferecem uma maior confiabilidade aos consumidores e uma melhor economia financeira em médio prazo.

Por fim, estima-se que aproximadamente duzentas mil famílias brasileiras ainda vivem sem energia elétrica, sendo a maior parte residente na zona rural (CARDOSO, 2015). Dessa forma, como exemplo de aplicação, os sistemas fotovoltaicos *Off-Grid* facilitam o acesso à eletricidade por parte dos consumidores afastados do sistema de distribuição, uma vez que esse sistema permite a própria geração de energia elétrica.

1.2 Justificativa

Os recursos naturais utilizados na produção de energia elétrica estão se esgotando, tanto a disponibilidade de água quanto questões relativas ao meio ambiente. Além disso, o valor de taxa de *quilowatt*-hora (kWh) pago por energia elétrica tem propensão ao crescimento. Esses dois fatores preocupam o consumidor brasileiro, fazendo com que este encontre uma alternativa para melhorar todo esse sistema, tornando-o mais sustentável e viável (LEITE, 2013).

Após a crise hídrica no ano de 2001, ocorreu uma inflação, em 8 anos, aumentando em 186% a conta de luz. Atualmente, vivenciando-se o mesmo cenário e com o aumento desenfreado por demanda energética, nota-se a tendência do sistema elétrico entrar em declínio. A falta de energia para vários consumidores, sendo por ocorrência de apagões ou até mesmo devido à ausência de rede pública de energia em determinadas regiões, faz com que o país perca investimentos e recursos financeiros, os quais movem a economia nacional. Dessa forma, com um maior investimento na energia solar fotovoltaica, espera-se um aumento na segurança energética, nesse aspecto (PORTAL SOLAR, 2016).

Sendo assim, o presente trabalho apresenta um estudo de viabilidade e proposição de um sistema fotovoltaico para geração de energia de fonte solar em residências, visando uma maior segurança ao consumidor, facilidade de manuseio do sistema, minimização de impacto ambiental e economia de custos referente à conta de energia elétrica. Por conseguinte, os sistemas fotovoltaicos apresentam diversos benefícios e assim, torna-se relevante a realização de estudos nessa área, a fim de que essa tecnologia seja cada vez mais difundida.

1.3 Hipótese

Considerando a energia solar fotovoltaica cada vez mais inserida na matriz energética do país, como uma fonte limpa e renovável, neste trabalho foi realizado o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico, analisando a viabilidade da

implantação do mesmo, de forma que a geração de energia elétrica esteja vinculada com uma economia no pagamento da conta de luz, contribuindo para a sustentabilidade ecológica do país. Essa análise foi fundamentada por cálculos e dados provenientes das concessionárias ANEEL e CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). Tal projeto foi desenvolvido para consumidores residenciais da cidade de Arcos - MG, possibilitando a geração de energia elétrica com menores impactos ambientais e fornecendo uma maior confiabilidade aos consumidores.

1.4 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar a viabilidade econômica do dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico, visando uma redução de custos aos consumidores, bem como uma diminuição da dependência de energia elétrica proveniente da distribuidora. O projeto propõe que o sistema opere diretamente conectado à rede elétrica convencional (sistema *On-Grid*). O dimensionamento foi realizado considerando como carga principal os consumidores residenciais da região central da cidade de Arcos - MG.

1.5 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, é necessário o estabelecimento de alguns objetivos específicos, tais como:

- Realizar uma revisão bibliográfica para conhecer o estado da arte da “Energia Solar Fotovoltaica” e do “Efeito Fotovoltaico”;
- Estudar sobre as peculiaridades dos sistemas fotovoltaicos: *On-Grid* e *Off-Grid*;
- Coletar contas de consumo de energia elétrica das unidades residenciais analisadas;
- Dimensionar os módulos fotovoltaicos e o inversor solar adequadamente;
- Realizar o levantamento de custo estimado do sistema solar fotovoltaico proposto;
- Comparar os *paybacks* dos sistemas fotovoltaicos real e ideal, verificando a análise econômica destes.

1.6 Organização do Texto

Essa monografia é organizada em sete capítulos, sendo que o Capítulo 2 possui temas necessários para a compreensão desse trabalho, como informações sobre sistemas fotovoltaicos e seus principais componentes, bem como a apresentação da resolução normativa da ANEEL nº 687 de 2015. Já o Capítulo 3, apresenta a metodologia utilizada, incluindo gráficos e tabelas referentes ao desenvolvimento do trabalho. Os resultados obtidos são descritos no Capítulo 4. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho. Algumas sugestões para trabalhos futuros são citadas no Capítulo 6, e por fim, as referências bibliográficas utilizadas são dispostas no capítulo 7.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são descritos conceitos importantes para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido, como a disponibilidade das fontes de energias renováveis no Brasil, com ênfase na energia solar fotovoltaica; informações sobre os equipamentos necessários em um sistema solar fotovoltaico; uma abordagem sobre a diferença entre os sistemas *On-Grid* e *Off-Grid* e uma apresentação em síntese da Resolução Normativa nº 687 da ANEEL.

2.1 Energia Alternativa

Energia alternativa é aquela proveniente de fontes que são relativamente limpas e seguras, quando comparadas com as fontes não renováveis, visto que não causam danos inerentes à utilização de combustíveis fósseis, como por exemplo, as emissões de CO₂. Essa substância, liberada para a atmosfera, contribui para o aquecimento global, interferindo, conseqüentemente, nas alterações climáticas do planeta. Dessa forma, tem-se a importância da utilização de fontes de energia alternativa, tanto no combate ao efeito estufa, quanto na redução da dependência de fontes energéticas externas. Além disso, as fontes renováveis de energia são consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização, uma vez que sempre se renovam, garantindo energia para a posteridade. Esses tipos de fontes de energia também beneficiam a economia e o ecossistema da Terra, sendo os principais tipos: energia solar, energia eólica, hidroeletricidade e energia geotérmica (PORTAL SOLAR, 2016) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A maior utilização das fontes de energia é na geração de eletricidade. A demanda e a dependência humana por esse tipo de energia tende ao crescimento, uma vez que, os países buscam, cada vez mais, novas alternativas para a geração de eletricidade sem prejudicar o planeta. Os impactos ambientais dessas fontes são inferiores àqueles proporcionados pelas tecnologias convencionais de energia. Geralmente, a indústria de energia renovável utiliza mais a mão-de-obra, diferenciando das indústrias de tecnologias convencionais, as quais preferem a utilização de máquinas. Dessa forma, aumenta o número de geração de empregos no uso de fontes alternativas de energia. Estima-se que nos próximos 15 anos, o setor de energia solar fotovoltaica deverá gerar, aproximadamente, 300 mil empregos diretos e indiretos para a população, movimentando a economia do país. (PORTAL SOLAR, 2016) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A energia alternativa no Brasil, no que se refere à geração de eletricidade, correspondeu a 84% de toda a matriz energética do país, em 2015. O Brasil possui um grande potencial de fontes de energia renováveis quando comparado com outros países, uma vez que a maioria da energia elétrica do país é advinda de usinas hidrelétricas. No entanto, o consumo por energia elétrica vem crescendo e, somente os reservatórios de energia hídrica não são suficientes para suprirem a demanda por eletricidade no país. Além disso, nos casos de uma nova crise hídrica, pode-se fazer necessário um racionamento de energia e um aumento no custo de energia elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015) e (PORTAL SOLAR, 2016).

O governo brasileiro não investe devidamente em geração de energia alternativa. No entanto, é necessário incentivar os consumidores brasileiros, bem como ampliar o mercado de utilização da energia alternativa no país. A Alemanha, por exemplo, pretende obter uma matriz energética 100% renovável em 2020, sendo que nem possui a vantagem da irradiação solar presente no Brasil, devido a sua posição estratégica, favorável às fontes alternativas (PORTAL SOLAR, 2016).

O primeiro desafio para que as fontes de energia sejam reconhecidas é a redução do custo da energia produzida, fato que é alcançado por meio de uma grande quantidade de consumidores. A inserção em larga escala de novas fontes de energia depende de regulamentações e da divulgação de normas técnicas, dentre outras ações governamentais (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Dessa forma, na próxima seção são apresentados conceitos sobre a energia solar fotovoltaica.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia fotovoltaica se baseia na captação da luz do Sol e na produção de corrente elétrica, diretamente proporcional a essa radiação solar. A corrente elétrica coletada pode ser utilizada tanto em sistemas conectados à rede, quanto armazenada em baterias. Os painéis fotovoltaicos, os quais podem ser visualizados na Figura 3, são responsáveis pela realização desse processo e podem ser instalados de forma a suprir necessidades residenciais ou industriais (PORTAL SOLAR, 2016) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).



Figura 3 - Arranjo fotovoltaico instalado em uma residência.

Fonte: (FRIZON SOLUÇÕES, 2015).

Em locais desprovidos de rede elétrica, a energia fotovoltaica é vista como uma forma de eletrificação dessas áreas e, mesmo aonde o atendimento de eletricidade já existe, pode-se trabalhar simultaneamente com a energia solar fotovoltaica e a rede elétrica pública, por meio dos sistemas fotovoltaicos conectados a rede (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Apesar da ascensão do uso da energia solar fotovoltaica, a falta de financiamento com juros baixos e de incentivo do governo é um dos principais desafios da energia solar no Brasil, bem como a falta de mão-de-obra qualificada para realizar as instalações dos sistemas de energia solar e o desinteresse da população brasileira (PORTAL SOLAR, 2016).

A utilização da energia solar apresenta algumas desvantagens como o alto custo de aquisição e a restrição de ser utilizada somente durante o dia. Todavia, com um banco de baterias, a energia para períodos noturnos e chuvosos é armazenada e, assim, a conexão na rede permanece (PORTAL SOLAR, 2016).

Já as vantagens, são inúmeras, dentre elas têm-se que esse tipo de energia é totalmente renovável e não polui o meio ambiente, possui uma manutenção mínima e uma fácil instalação, e ainda pode ser usada em áreas distantes com ausência de energia elétrica. Além disso, o processo fotovoltaico é totalmente silencioso, não havendo distúrbios na geração da energia solar (PORTAL SOLAR, 2016).

A Figura 4 apresenta a evolução, por meio de um gráfico, da potência solar instalada no mundo entre os anos de 2010 a 2014, em relação à produção de eletricidade. Já a Figura 5, mostra uma tabela, na qual nota-se a participação relativa dos países na matriz energética mundial, sendo que a Alemanha é a maior produtora. Os mercados de energia fotovoltaica que mais evoluem são a Alemanha, a China, o Japão, a Itália e os EUA; juntos os cinco primeiros colocados nesse *ranking* abrangem 126,4 *gigawatts* (GW) da capacidade mundial (ORGIS, 2015) e (PORTAL SOLAR, 2016).

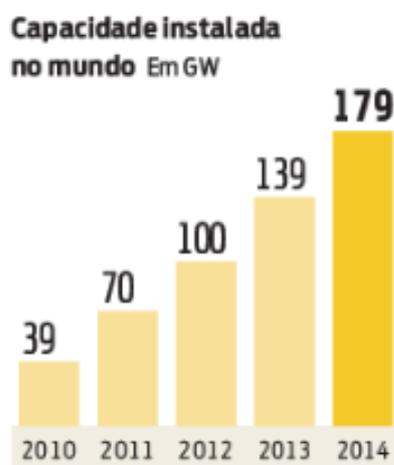


Figura 4 - Evolução da potência solar instalada no mundo, entre os anos de 2010 e 2014.

Fonte (ORGIS, 2015).

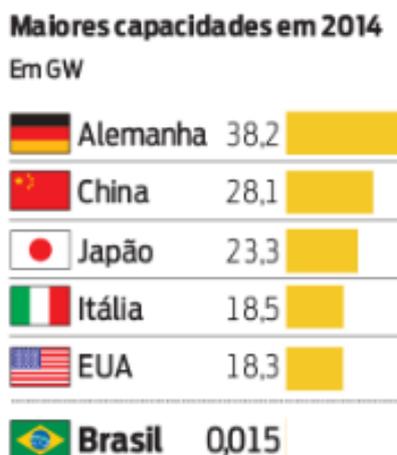


Figura 5 - Maiores potências instaladas por país, no ano de 2014.

Fonte: (ORGIS, 2015).

A energia solar fotovoltaica está sendo utilizada em mais de 100 países, sendo considerada a 3ª fonte de energia alternativa mais importante no que diz respeito à capacidade instalada a nível mundial. Esse tipo de sistema fotovoltaico já atendeu diversas residências brasileiras, por meio do programa “Luz Para Todos”, criado pelo Governo Federal em 2003 (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (PORTAL SOLAR, 2016).

No Brasil, existem diversos benefícios econômicos advindos da utilização da energia solar fotovoltaica, como por exemplo, as unidades consumidoras gerarem sua própria energia. Além disso, a energia solar ainda proporciona benefícios ambientais para o país, visto que com a instalação desse tipo de energia, não seria mais necessário inundar e desapropriar áreas de florestas para construção de usinas hidrelétricas (PORTAL SOLAR, 2016).

A utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede cresce cada vez mais, uma vez que a aprovação da microgeração e da minigeração, com sistemas de distribuição conectados em baixa tensão e alimentados por fontes renováveis de energia, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estimulou esse processo. Além disso, ainda foi lançado, em 2011, um projeto de “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”, visando uma maior implantação da energia solar fotovoltaica no país (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) foi criada, em 2013, com a finalidade de impulsionar o mercado do setor de energia solar no país. O “Solcial”, primeiro programa social de energia solar no Brasil, foi uma iniciativa para conceder acessibilidade a esta fonte de energia renovável. Além disso, pode-se mapear o recurso solar em todo o país, por meio do “Atlas Solarimético Brasileiro”, o qual fornece os valores da radiação solar em todo o território, por localidades e meses do ano. Pode-se notar, na Figura 6, que essa radiação varia entre 14 a 22 *megajoules* (MJ) por metro quadrado (m²) durante o dia (ANEEL, 2004) e (PORTAL SOLAR, 2016).

A energia solar fotovoltaica, no Brasil, tem um potencial significativo de crescimento, uma vez que as condições climáticas e a extensão territorial do país são bastante favoráveis. Além de ser uma fonte alternativa, a energia fotovoltaica é uma opção viável e promissora para complementar e ampliar a geração de eletricidade no país. No entanto, apesar do vasto potencial de utilização, o desinteresse e/ou desconhecimento dessa tecnologia por parte dos brasileiros é considerável (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

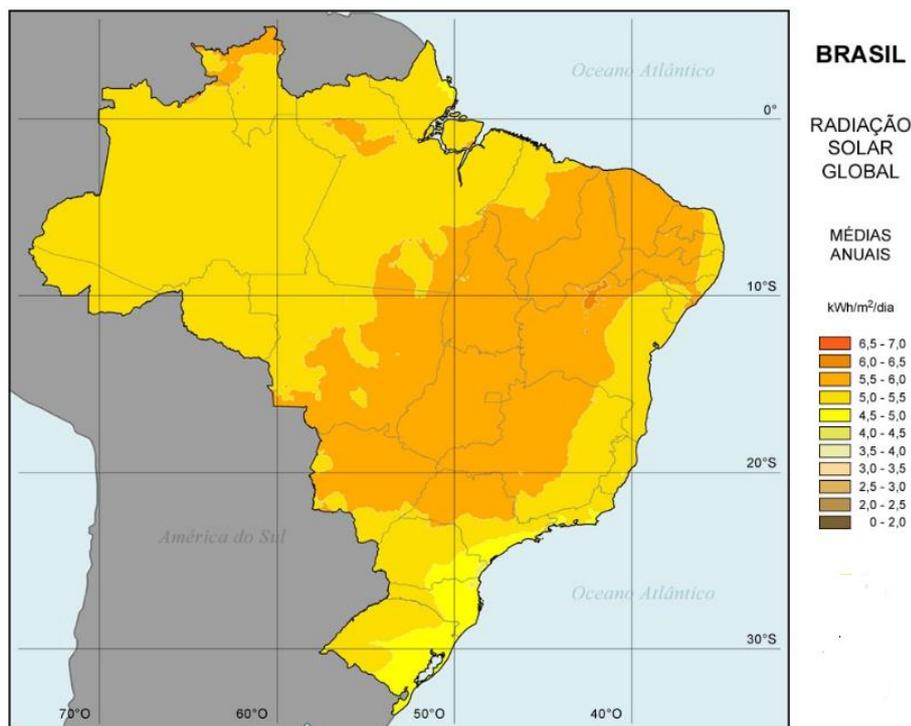


Figura 6 - Radiação solar no território brasileiro.

Fonte adaptada de: (ECOIA, 2010).

O pouco uso da energia solar, no Brasil, estava relacionado com a ausência de regulamentação e de normas técnicas para o setor fotovoltaico. Entretanto, nos anos de 2011 e 2012, novos projetos e fóruns de discussão foram propostos, a fim de incentivar a inserção da energia solar fotovoltaica no país. O Grupo Setorial de Energia Fotovoltaica da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) e a comissão de estudos CE-03:082.01 do Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações (COBEI) foram alguns dos responsáveis pela criação e discussão de normas técnicas, bem como pela sugestão de melhorias para o setor fotovoltaico. Quando essas dificuldades forem vencidas, os benefícios da utilização dos sistemas fotovoltaicos serão evidenciados, como o aumento da disponibilidade de energia elétrica e o crescimento tecnológico nessa área (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Dessa forma, na próxima seção são apresentados os conceitos teóricos sobre o efeito fotovoltaico.

2.3 Efeito Fotovoltaico

Edmond Becquerel, físico e cientista francês, foi o pioneiro a demonstrar o efeito fotovoltaico, com a construção da primeira célula fotovoltaica do mundo. Em 1905, Albert

Einstein explicou o efeito fotoelétrico em um de seus artigos, por meio de uma nova teoria quântica da luz, sendo homenageado, posteriormente, com o recebimento do Prêmio Nobel de Física. O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que se baseia na conversão da luz solar em eletricidade e ocorre com a absorção de fótons de luz e, posterior liberação de elétrons. A corrente elétrica é gerada quando estes elétrons livres são capturados, ou seja, quando a luz é incidida em uma célula composta por materiais semicondutores (PORTAL SOLAR, 2016), (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (MIRANDA, 2014).

A utilização do efeito fotovoltaico, na prática, levou-se a confecção de células fotovoltaicas, que são apresentadas na próxima subseção.

2.3.1 Células Fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica, normalmente feita de silício ou de outro material semicondutor, é um dispositivo elétrico que tem como função converter a energia da luz solar diretamente em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. O processo de conversão se baseia na incidência da luz solar sobre uma célula e, assim, os elétrons do material semicondutor se movimentam, gerando eletricidade. Uma célula fotovoltaica é composta por duas camadas semicondutoras P e N, uma grade superior de coletores metálicos, uma base metálica inferior e dois terminais elétricos, conforme apresentado na Figura 7. Geralmente, são utilizadas 36, 60 ou até 72 células fotovoltaicas interligadas em série para montar um painel (módulo) fotovoltaico. Na próxima subseção são apresentados conceitos referentes aos painéis fotovoltaicos (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

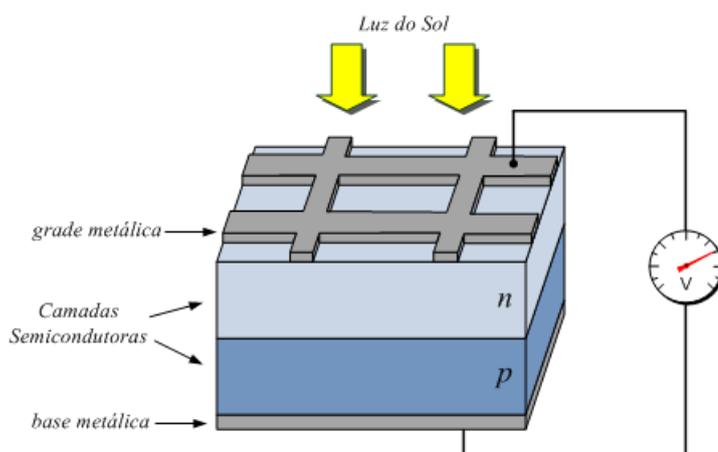


Figura 7 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.

Fonte: (LAB SOLAR, 2011).

2.3.2 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são essenciais em um sistema solar fotovoltaico e são compostos por uma vasta gama de materiais, sendo os painéis de silício os mais comuns, visto que o silício é o segundo elemento mais abundante na natureza (RÜTHER, 2008).

O elemento fotovoltaico fundamental é a célula fotovoltaica. No entanto, devido ao baixo nível de tensão em seus terminais, é necessário agrupar várias células, formando um painel fotovoltaico, visando um aumento na produção de eletricidade. Geralmente, faz-se necessário até a conexão entre os próprios painéis, de forma a obter os níveis de tensão e potência desejados para a correta operação do sistema. Esse conjunto de células se localiza sobre uma estrutura rígida e se conectam eletricamente, com a finalidade de produzir maiores tensões (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (RÜTHER, 2008).

A corrente elétrica produzida por cada célula é diretamente proporcional com a área e a captação da luz solar, ou seja, quanto maior a extensão da célula fotovoltaica, mais luz solar ela consegue coletar. O módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante em seus terminais, uma vez que a corrente e a tensão são interdependentes. A corrente sofre influência da radiação solar, e a tensão, por sua vez, é influenciada pela temperatura e, com o aumento desta, haverá uma consequente diminuição da potência (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

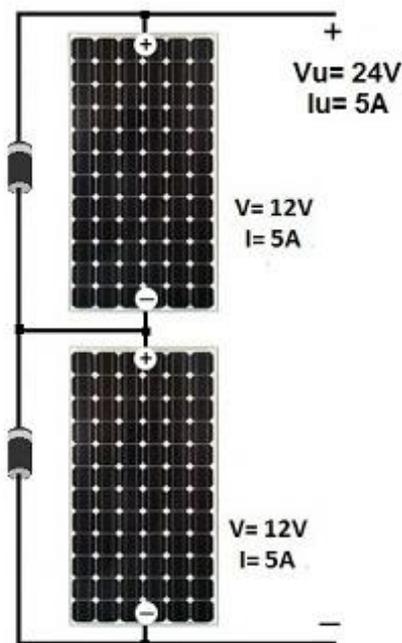


Figura 8 - Painéis fotovoltaicos agrupados na configuração série.

Fonte: (LEIAUT DICAS, 2016).

Os módulos fotovoltaicos podem se agrupar em série ou em paralelo, conforme a sua utilização. Quando conectados em série, conforme a Figura 8, 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. Já na conexão em paralelo, como apresentado na Figura 9, o processo é inverso, 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 (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

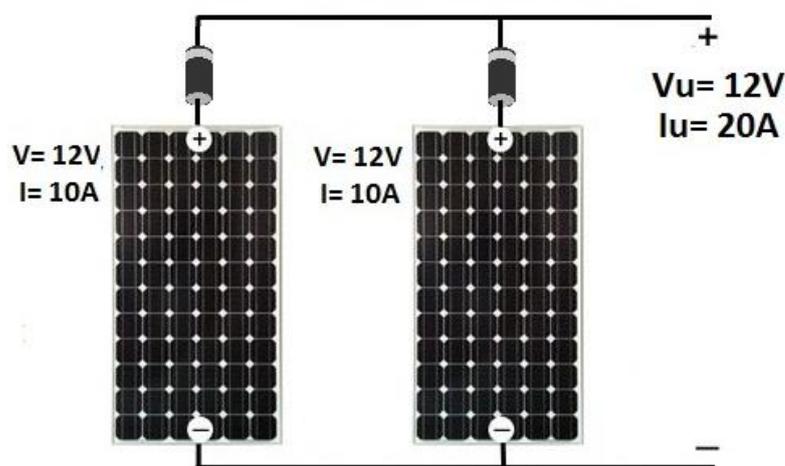


Figura 9 - Painéis fotovoltaicos agrupados na configuração paralelo.

Fonte: (LEIAUT DICAS, 2016).

Para uma escolha adequada da utilização de módulos fotovoltaicos e que, ao mesmo tempo, satisfaça o consumidor, é necessário seguir uma sequência de observações sobre os módulos (PORTAL SOLAR, 2016):

- Garantia, tipo, eficiência e fabricante (Ficha técnica);
- Tolerância de Potência;
- Qualidade da “moldura” de alumínio;
- Diodos *Bypass*;
- Custo e coeficiente de temperatura.

A ficha técnica é um fator importante na escolha de um módulo fotovoltaico, uma vez que por meio desta, nota-se a garantia mínima e a porcentagem de utilização da sua potência original. Já a eficiência de um painel, é definida pelo tanto de energia do sol que é captada pelo mesmo e convertida para o consumo, ou seja, quantos *Watts/hora* por m^2 são gerados pelo painel fotovoltaico. Esse processo é diretamente proporcional à eficiência,

sendo que esta já é inversamente proporcional ao tamanho do painel. Outro fator importante para análise é o coeficiente de temperatura, o qual demonstra a conexão do painel solar fotovoltaico com temperaturas quentes. Se este coeficiente for alto, indica um painel de baixa qualidade. Os níveis aceitáveis estão entre 0,4 e 0,5%, enquanto os ideais oscilam entre 0,3 e 0,45% (PORTAL SOLAR, 2016).

Para otimizar a geração de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos, são necessárias algumas informações sobre a posição (orientação) correta de instalação dos painéis. Sendo assim, na próxima subseção, são apresentados conceitos referentes a este procedimento.

2.3.2.1 Orientação dos Painéis Fotovoltaicos

Para que os módulos fotovoltaicos sejam instalados de maneira correta, primeiramente, é necessário compreender sobre o funcionamento da incidência solar na Terra. Os raios solares são ondas eletromagnéticas que se deslocam até o planeta, de forma paralela. Cada um desses raios, quando entra em contato com o solo, possui uma inclinação distinta, a qual depende da posição da Terra e do Sol durante todo o ano (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Sem um sistema de rastreamento solar, a direção mais indicada para instalação do módulo fotovoltaico é com a face voltada para o norte geográfico, com a finalidade de aproveitar a luz solar durante todo o dia, com maior incidência na superfície ao meio-dia, uma vez que o ângulo azimutal analisado é nulo. No Brasil, a posição ideal para os painéis fotovoltaicos também é direcionada para o Norte, uma vez que o Sol nasce no leste, sobe se inclinando ao Norte e se põe no Oeste (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (PORTAL SOLAR, 2016).

Uma residência, com a frente voltada para o norte, “visualiza” o Sol descrevendo uma trajetória circular no céu, conforme apresentado na Figura 10. O ângulo de inclinação com o plano horizontal é maior nos dias de verão, aonde os raios solares incidem sobre a casa com um ângulo zenital menor. Já nos dias de inverno, esse ângulo é menor e o Sol se localiza mais baixo, próximo à linha do horizonte (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Assim, para o gerador de energia solar produzir mais energia, deve-se instalar o painel fotovoltaico em uma localização sem sombras do telhado. Além disso, deve-se analisar o ângulo de inclinação, o qual deve ser orientado de forma otimizada à aplicação da captação solar. No Brasil, utiliza-se, usualmente, a inclinação equivalente ao da latitude

do local e nunca menor que 15° , visando também, facilitar a autolimpeza dos módulos (PORTAL SOLAR, 2016) e (MIRANDA, 2014).

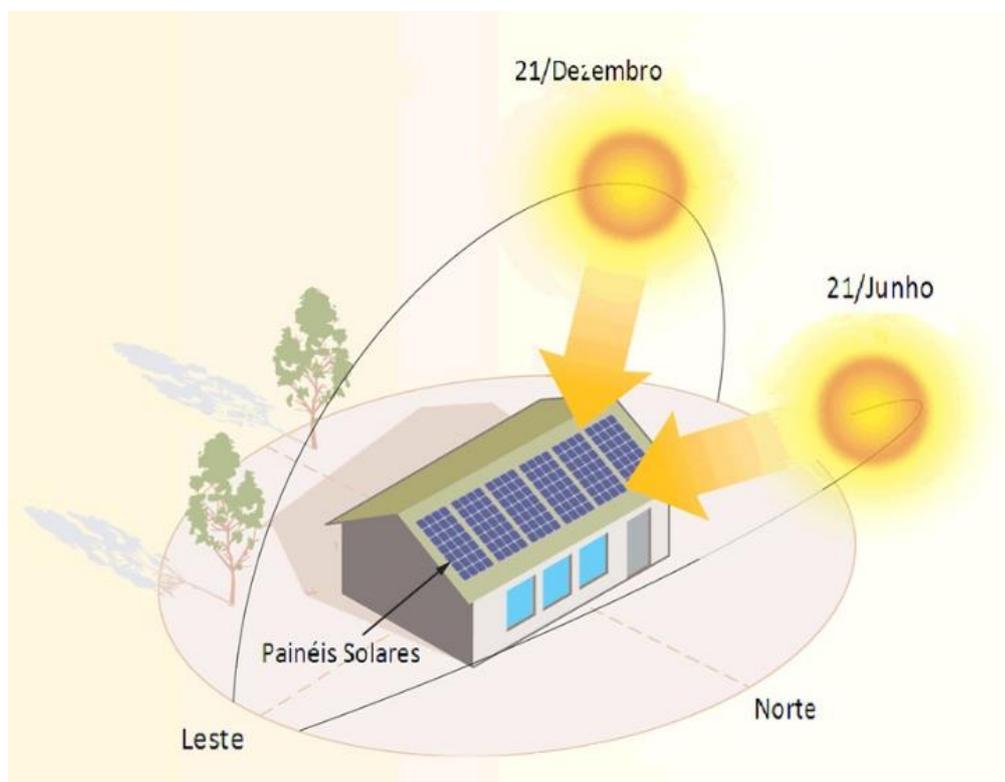


Figura 10 - Movimento aparente do sol durante o verão e o inverno.

Fonte: (SUN ENERGY, 2016).

Se não houver face do telhado direcionada ao Norte, perdas ocorrerão, as quais variam de 3% a 20%, dependendo da direção determinada, sendo que a direção Sul, em hipótese alguma pode ser escolhida. Se houver dúvida entre duas faces do telhado voltadas para o Norte, com duas latitudes distintas, deve-se optar pelo menor grau de inclinação do que a latitude do local, a fim de produzir mais energia. Enfim, na instalação de um sistema de energia solar fotovoltaica, é necessário obter informações sobre a inclinação, a localização geográfica do país e as perdas de energia conforme a orientação (PORTAL SOLAR, 2016).

Após a apresentação dos painéis e de suas orientações de instalação, é necessário definir outro componente essencial dos sistemas fotovoltaicos, o inversor, que é apresentado na próxima subseção.

2.3.3 Inversores

Os painéis fotovoltaicos, e também o banco de baterias, geram energia na forma de corrente contínua (CC). No entanto, a maioria dos aparelhos eletrodomésticos opera com a rede elétrica de tensão e corrente alternada (CA). Dessa forma, tanto em sistemas isolados quanto em sistemas conectados à rede pública de energia, faz-se necessária a presença de um inversor, que seja responsável pela conversão da energia CC proveniente dos módulos solares e/ou baterias em energia CA, conforme as especificações definidas pelas unidades consumidoras que serão alimentadas pelo sistema fotovoltaico (CÂNDIDO, 2010) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

O inversor *Grid Tie*, em sistemas conectados à rede elétrica, sincroniza a energia fornecida pelos painéis solares com a energia utilizada em casa ou na empresa. Esse processo de sincronização depende da conexão do inversor à rede distribuidora de energia. Se a rede estiver sem energia, o inversor isola o sistema fotovoltaico da rede, proporcionando segurança ao sistema. Sabe-se que devido à instabilidade da rede, ocorre uma frequente variação da energia e o inversor deve trabalhar com uma margem de tolerância (PORTAL SOLAR, 2016).

Existem diversos tipos de inversores e várias maneiras de utilizá-los, como por exemplo, somente um inversor pode ficar responsável por toda a energia do sistema fotovoltaico ou pode ser necessária uma associação de vários inversores no mesmo sistema. Além da função básica de converter energia CC em CA, um inversor deve ser eficiente, confiável e apresentar segurança. Aliás, a segurança é uma característica primordial, visto que podem ocorrer sobrecargas, desvios na frequência ou tensão e o fenômeno de ilhamento. Segundo o fenômeno de ilhamento, comum nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, não se pode injetar, em hipótese alguma, energia na rede pública quando esta estiver desligada. Se ocorrer, a rede é energizada e os operadores, bem como os transformadores da rede pública, são prejudicados (CÂNDIDO, 2010).

Além do inversor, outro componente importante em sistemas fotovoltaicos é o medidor bidirecional, o qual é apresentado na próxima subseção.

2.3.4 Medidor Bidirecional

Em um sistema solar fotovoltaico, faz-se necessária a troca do medidor antigo por um medidor com leitura bidirecional, o qual contabiliza a energia recebida da distribuidora

e a energia solar que é injetada na rede elétrica. A partir de sua medição, a fatura de energia elétrica da unidade consumidora é gerada (ENEL SOLUÇÕES, 2015) e (PORTAL SOLAR, 2016).

Este tipo de equipamento mede a energia da rede, que é consumida na ausência solar e o excesso gerado quando tem muito sol. Esse excesso de eletricidade volta para a rede elétrica por meio do medidor bidirecional. A energia solar que vai para a rede distribuidora se torna "créditos de energia" para serem utilizados posteriormente. Os créditos de energia são regulamentados pela ANEEL, possuindo regras específicas que variam de acordo com a sua localização e sua classe de consumo (residência, comercial ou industrial) (PORTAL SOLAR, 2016).

Além disso, outras normas devem ser seguidas, segundo a Superintendência Comercial de Distribuição (COPEL, 2015):

- O medidor deve medir e registrar a energia ativa em ambos os sentidos de fluxo;
- O medidor polifásico deve medir e registrar as energias ativa e reativa;
- O medidor deve apresentar no mostrador somente a energia ativa em kWh;
- O cálculo e registro da energia não devem considerar a contribuição proveniente das frequências harmônicas;
- No medidor polifásico é desejável indicação de tensão nas fases e suas respectivas sequências.

Após a apresentação dos componentes fundamentais de um sistema fotovoltaico, na próxima seção, são apresentados conceitos referentes aos dois tipos de sistemas utilizados comercialmente.

2.4 Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como sistemas diretamente conectados à rede (*On-Grid*) ou sistemas isolados (*Off-Grid*). A seleção de qual sistema utilizar depende da aplicação e dos requisitos almejados tanto pelo consumidor quanto pela rede de distribuição. Nas próximas subseções, ambos os sistemas são apresentados para uma melhor compreensão do trabalho.

2.4.1 Sistemas *On-Grid* (*Grid-Tie*)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o qual pode ser visualizado na Figura 11, operam simultaneamente com a rede pública de distribuição de energia e são responsáveis por fornecer eletricidade, principalmente, para residências e prédios comerciais. Esses sistemas trabalham com a finalidade de redução ou eliminação do consumo por meio da rede pública, visando uma independência em relação à concessionária (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (CÂNDIDO, 2010).

Quando a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos é superior à demanda imposta pelas cargas, o excedente dessa energia é injetado na rede pública e o proprietário adquire um crédito energético. Tais créditos são reservados por um período de 60 meses e, caso o proprietário não os utilize, os mesmos ficam para a distribuidora de energia elétrica (ANEEL, 2015) e (CÂNDIDO, 2010).

Esta troca de energia entre as distribuidoras e as residências que adquirem esse sistema promove uma redução de custos na conta de energia elétrica da residência. Em contrapartida, quando o sistema solar gera energia inferior a demandada pela carga, o déficit é suprido pela rede elétrica. Na ausência de luz solar, a rede pública também fica responsável pela alimentação das cargas (CÂNDIDO, 2010) e (BOSO; GABRIEL; FILHO, 2015).

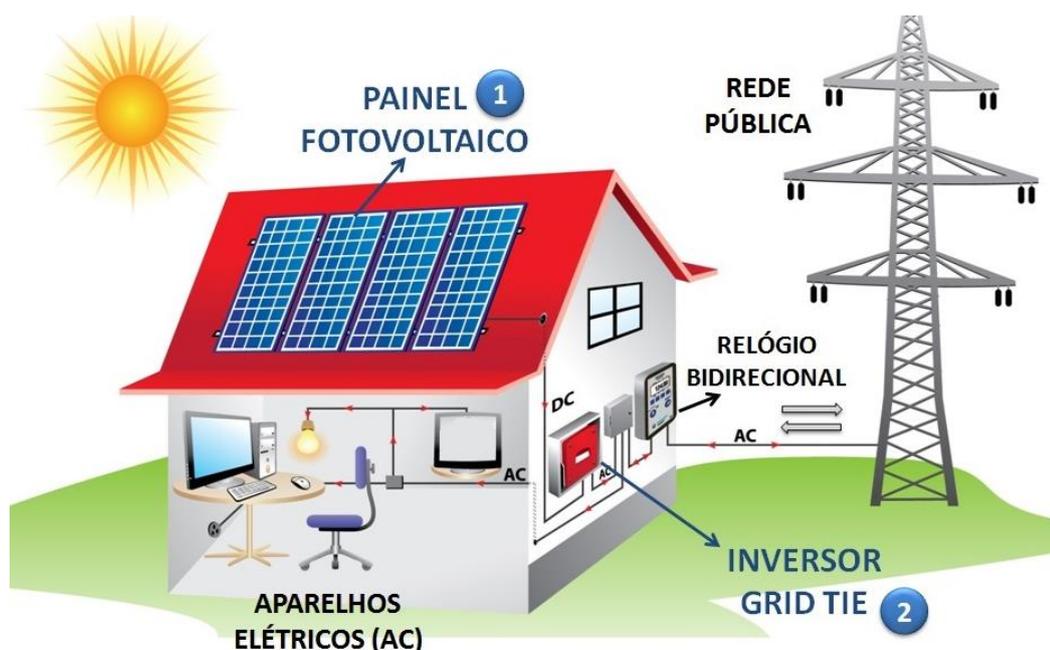


Figura 11 - Funcionamento do sistema fotovoltaico On-Grid.

Fonte: (SUN ENERGY, 2016).

Os sistemas *On-Grid* podem ser classificados em três categorias: microgeração, minigeração e usinas de eletricidade; conforme a Resolução nº 687 da ANEEL, publicada em 2015. Com essa normativa, foi permitida a construção de micro e minissistemas fotovoltaicos com a finalidade de produzir eletricidade para o próprio consumo do usuário (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (ANEEL, 2015).

A microgeração possui potência instalada igual ou até 75 kW, enquanto a minigeração possui potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW. Os sistemas de micro e minigeração fotovoltaica, geralmente, são instalados em consumidores comerciais e industriais, visando suprir a demanda de energia elétrica desses consumidores. Dessa forma, ocorre a economia na conta de luz, uma vez que a dependência da energia elétrica da rede pública é reduzida (VILLALVA; GAZOLI, 2013) e (ANEEL, 2015).

Já as usinas de eletricidade, possui potência instalada acima de 3 MW e são constituídas por grandes conjuntos de módulos fotovoltaicos, os quais são conectados a inversores centrais, que por sua vez, são ligados a cabines de transformação. Nesta última etapa do processo, os transformadores ficam responsáveis por elevar as tensões do sistema fotovoltaico a valores aceitáveis no sistema elétrico e, as linhas de transmissão têm a função de transportar essa energia (ANEEL, 2015) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Após as informações sobre o funcionamento do sistema fotovoltaico *On-Grid*, bem como a classificação de suas categorias, conforme as normas descritas na ANEEL, são apresentados, na próxima subseção, os sistemas fotovoltaicos *Off-Grid*.

2.4.2 Sistemas *Off-Grid*

O sistema *Off-grid* é um sistema fotovoltaico autônomo sendo, geralmente, utilizado em locais não atendidos pela rede pública. Esses sistemas necessitam de um banco de baterias, para armazenar a energia produzida pelas placas fotovoltaicas, em períodos de ausência de radiação solar (CÂNDIDO, 2010) e (BOSO; GABRIEL; FILHO, 2015).

Além de suprir as necessidades energéticas de uma única residência ou de um pequeno conjunto de consumidores, os sistemas autônomos também podem ser empregados, por exemplo, na iluminação pública, na sinalização de estradas, em estações de telefonia e em monitoramento remoto (CÂNDIDO, 2010).

Um sistema fotovoltaico autônomo é habitualmente composto por um painel fotovoltaico ou um conjunto de módulos, um controlador de carga, um banco de baterias e um inversor CC/CA. O funcionamento desse sistema se inicia com a produção de energia pelo painel, gerando tensão e corrente elétrica contínuas. Assim, para determinados aparelhos eletrodomésticos, faz-se necessário o uso de um inversor para converter essa energia em corrente e tensão alternadas. Caso o banco de baterias for utilizado, é essencial a presença de um controlador de carga, o qual é responsável pelo carregamento das baterias. A Figura 12 apresenta uma montagem típica de um sistema isolado (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

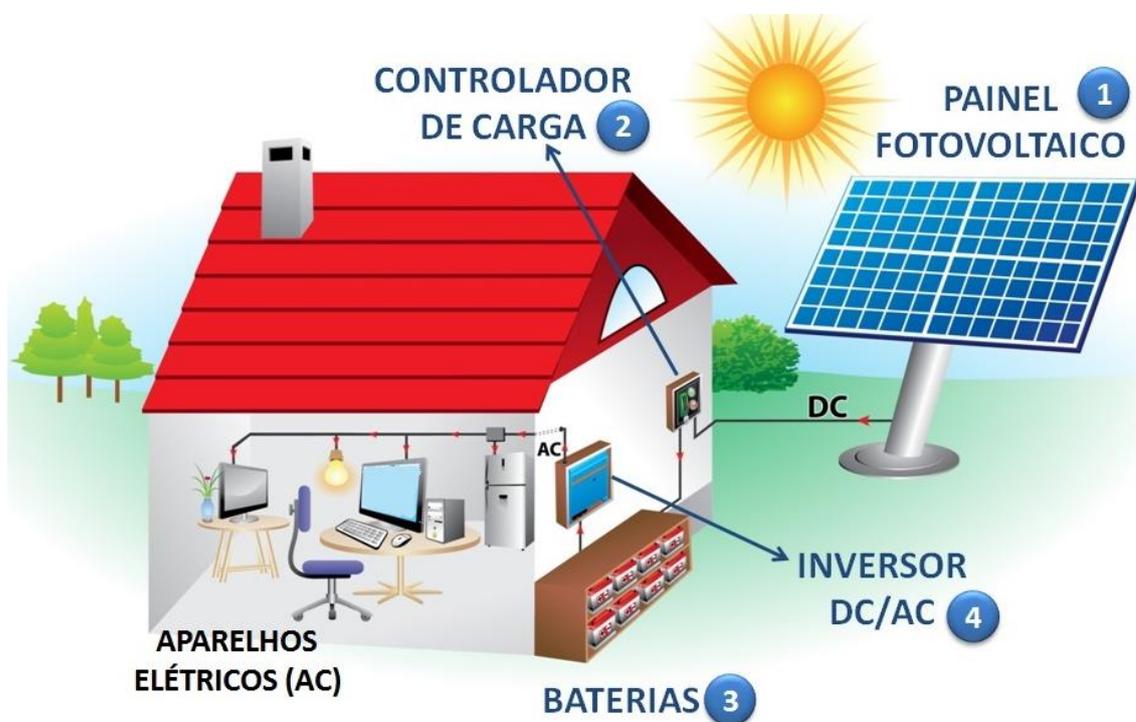


Figura 12 - Funcionamento do sistema fotovoltaico Off-Grid.

Fonte: (SUN ENERGY, 2016).

2.4.2.1 Baterias

Em sistemas fotovoltaicos autônomos, as baterias funcionam como um sistema armazenador, que absorve o excesso de energia gerada, visando compensar a falta de energia quando a radiação solar é inexistente. Dessa forma, haverá um fornecimento constante de energia ao consumidor e o desperdício de energia gerada, quando o consumo for baixo, é evitado (CÂNDIDO, 2010) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Os bancos de baterias são conjuntos de baterias agrupados em série, em paralelo ou em ambas as configurações, que têm como função aumentar a tensão, a corrente elétrica, ou elevar, simultaneamente, as duas grandezas. As baterias ainda funcionam como um intermediador entre o módulo e o restante do sistema, com a finalidade de estabilizar a tensão fornecida ao inversor ou aos equipamentos (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

As baterias vão se desgastando conforme sua utilização. Sabe-se que a vida útil de uma bateria depende da quantidade de ciclos de carga e descarga que ela pode realizar. Alguns dos métodos que auxiliam no aumento da vida útil da bateria são: a manutenção da carga quando não está em uso, processo denominado flutuação; a operação do sistema em ambientes de temperatura controlada e; o uso do controlador de carga, evitando sobrecargas e descargas muito profundas (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Quando os custos com manutenção e operação das baterias são considerados, nota-se que é um dos componentes mais caros do sistema, visto que a vida útil de uma bateria é aproximadamente seis vezes menor que a vida útil de um painel fotovoltaico. Assim, tem-se a importância de escolher uma bateria adequada, que satisfaça a aplicação e o consumidor (CÂNDIDO, 2010).

Algumas das características desejáveis para baterias aplicadas a sistemas fotovoltaicos são (CÂNDIDO, 2010):

- Elevada vida cíclica para descargas profundas;
- Necessidade de pouca ou nenhuma manutenção;
- Elevada eficiência de carregamento;
- Confiabilidade;
- Larga faixa de temperatura de operação;
- Alta densidade de energia.

Como não há possibilidade de se encontrar uma bateria que possua todas essas características desejáveis, faz-se necessário optar dentre as baterias disponíveis, aquela que mais se encaixa na aplicação e expectativas do consumidor. As baterias de Chumbo Ácido e Níquel Cádmio são as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos e apresentam baixo custo e larga faixa de energia disponível comercialmente (CÂNDIDO, 2010).

2.4.2.2 Controlador de Carga

O controlador de carga, também denominado gerenciador de carga, é responsável por regular a transferência de energia do painel fotovoltaico para o banco de baterias e das

baterias para as cargas. As principais funções desse componente do sistema fotovoltaico são: proteção contra sobrecargas e descargas excessivas e gerenciamento da carga do banco de baterias. Com esse controle, quando a carga for plena, os painéis fotovoltaicos devem ser desconectados e quando um determinado nível de segurança for atingido, as baterias também são desconectadas. Além disso, o controlador de carga visa o prolongamento da vida útil das baterias (CÂNDIDO, 2010) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A maneira mais comum para determinar o estado de carga do banco de baterias é por meio da medição de tensão. Para isso, é estabelecido um limite máximo e mínimo, sendo que a tensão do banco deve permanecer entre esses valores, de modo a manter uma operação segura e não prejudicar a vida útil do banco de baterias (CÂNDIDO, 2010).

Os principais tipos de controladores de carga são os convencionais (chave série e chave paralela) e os eletrônicos (com PWM e com PEM/MPPT). Os tipos mais utilizados comercialmente são os controladores com configuração *shunt* e os controladores de configuração série, sendo que este é preferível, uma vez que consome menos energia. O regulador de carga do tipo *shunt* interrompe ou reduz a corrente entregue ao banco de baterias, quando submetidas à plena carga. Já nos reguladores de configuração série, quando a tensão das baterias atinge o valor limite de plena carga, os painéis fotovoltaicos são desconectados (CÂNDIDO, 2010) e (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Após a descrição dos sistemas fotovoltaicos e seus componentes fundamentais, torna-se necessário apresentar a resolução normativa nº 687 da ANEEL, a qual traz grandes melhorias para o incentivo e desenvolvimento da geração de energia elétrica solar, principalmente por parte da unidade consumidora. Essa resolução permite facilidades ao consumidor, de forma que este invista na sua própria geração de energia elétrica, obtendo o controle de sua conta de luz. Além disso, essa resolução oferece diversos benefícios como o autoconsumo remoto, a redução na espera para a conexão de rede e a disponibilidade para geração compartilhada. Essa resolução normativa é apresentada na próxima seção (ENEL SOLUÇÕES, 2016).

2.5 Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL

A Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, propõe algumas modificações no que se refere à Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST (ANEEL, 2015).

Segundo o Artigo 1º, ficou definido que a microgeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto a minigeração distribuída possui uma potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas (ANEEL, 2015).

Já o sistema de compensação de energia elétrica, estabelece que a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída seja cedida, por meio de empréstimo, à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Dessa forma, conforme o Artigo 4º, a unidade consumidora passa a ter um crédito válido em um prazo de 60 (sessenta) meses (ANEEL, 2015).

A geração compartilhada passa a ser caracterizada por unidades consumidoras, com microgeração ou minigeração, distribuídas em locais diferentes daqueles aonde a energia excedente será compensada. Quando as unidades são distribuídas nesses locais, é denominado autoconsumo remoto (ANEEL, 2015).

Segundo o Artigo 2º, a potência instalada da microgeração e da minigeração distribuída fica limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora, onde a central geradora será conectada. Além disso, é vedada a divisão de central geradora em unidades de menor porte, para se enquadrar nos limites de potência, devendo a distribuidora identificar esses casos, solicitar a readequação da instalação e, caso não atendido, negar a adesão ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (ANEEL, 2015).

Os custos de eventuais melhorias no sistema de distribuição, em função exclusivamente da conexão de microgeração distribuída, não devem fazer parte do cálculo da participação financeira do consumidor, sendo integralmente arcados pela distribuidora. Já com os custos referentes à minigeração distribuída, o procedimento é inverso, conforme dito no artigo 3º (ANEEL, 2015).

Segundo o artigo 4º dessa resolução, podem aderir ao sistema de compensação de energia elétrica, os consumidores responsáveis por unidade consumidora (ANEEL, 2015):

- com microgeração ou minigeração distribuída;
- integrante de empreendimento de múltiplas unidades consumidoras;
- caracterizada como geração compartilhada;
- caracterizada como autoconsumo remoto.

No faturamento de unidade consumidora, integrante do sistema de compensação de energia elétrica, devem ser observados os seguintes procedimentos (ANEEL, 2015):

1. deve ser cobrado, conforme o caso, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A;
2. para o caso de unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, o faturamento deve considerar a energia consumida, deduzidos a energia injetada ou o percentual de energia excedente, e eventual crédito de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores, por posto tarifário, sobre os quais deverão incidir todas as componentes da tarifa;
3. o excedente de energia, que não tenha sido compensado na própria unidade consumidora, pode ser utilizado para compensar o consumo de outras unidades consumidoras;
4. quando encerrada a compensação de energia, dentro do mesmo ciclo de faturamento, os créditos remanescentes devem permanecer na unidade consumidora a que foram destinados;
5. quando a unidade consumidora onde ocorreu a geração excedente for faturada na modalidade convencional, os créditos gerados devem ser considerados como geração em período fora de ponta, no caso de se utilizá-los em outra unidade consumidora;
6. os créditos de energia ativa expiram em 60 meses, após a data do faturamento, e serão revertidos em prol da modicidade tarifária, sem que o consumidor faça jus a qualquer forma de compensação, após esse prazo;
7. eventuais créditos de energia ativa, existentes no momento do encerramento da relação contratual do consumidor, devem ser contabilizados pela distribuidora, em nome do titular da respectiva unidade consumidora, pelo prazo máximo de 60 meses após a data do faturamento;
8. a fatura dos consumidores que possuem microgeração ou minigeração distribuída deve conter, a cada ciclo de faturamento:
 - a) informação da participação da unidade consumidora no sistema de compensação de energia elétrica;
 - b) o saldo anterior e atualizado de créditos;
 - c) a energia elétrica ativa consumida e injetada, por posto tarifário;
 - d) histórico da energia elétrica ativa consumida e da injetada nos últimos 12 ciclos de faturamento;

9. para unidades consumidoras, classificados na subclasse residencial de baixa renda, deve-se, primeiramente, aplicar as regras de faturamento previstas no artigo e, em seguida, conceder os descontos.

Segundo o artigo 7º, a distribuidora é responsável técnica e financeiramente pelo sistema de medição para microgeração distribuída, de acordo com as especificações técnicas do PRODIST. Já os custos de adequação do sistema de medição, para a conexão de minigeração distribuída e de geração compartilhada, são de responsabilidade do interessado (ANEEL, 2015).

A distribuidora é totalmente responsável pela coleta das informações das unidades consumidoras, participantes do sistema de compensação de energia elétrica, e envio dos dados para registro junto à ANEEL, conforme dito no artigo 9º (ANEEL, 2015).

Além disso, segundo o artigo 14º dessa resolução, as distribuidoras devem revisar e publicar nos respectivos *sites*, as normas técnicas que tratam do acesso de microgeração e minigeração distribuída, utilizando como referência o Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2015).

A Resolução Normativa nº 687 da ANEEL foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho, uma vez que normatiza e discute a redução de custo no pagamento da energia elétrica das unidades consumidoras, bem como aborda e traz outros benefícios essenciais ao trabalho, como por exemplo, a compensação por créditos da energia elétrica consumida.

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

3. METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Nesta monografia de trabalho de conclusão de curso, foi proposto o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico na região central da cidade de Arcos - MG, considerando o consumo médio de energia elétrica, estimado a partir de informações obtidas em contas relacionadas ao consumo de energia elétrica provenientes da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). Posteriormente, avaliou-se a irradiação solar média diária para a região analisada, dado extraído do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito). Além disso, outros temas foram abordados, a fim de que o dimensionamento do sistema solar possuísse uma configuração mais adequada.

Dentre os dois tipos existentes de sistema solar fotovoltaico, adotou-se o sistema *On-Grid*, devido à ausência de baterias, o que implica em uma redução de custo do projeto, bem como, o aproveitamento do excedente gerado ser injetado diretamente na rede, gerando créditos com a concessionária. Este fato diminui o valor de manutenção do sistema, além de acarretar menos danos ao meio ambiente (SILVA E CALDAS, H. H., 2016).

Dessa forma, dimensionaram-se os módulos fotovoltaicos, definindo a quantidade desses, conforme um suprimento mais adequado das necessidades energéticas da região analisada. Similarmente, por meio de cálculos e análises, definiu-se o inversor apropriado. Por fim, explicou-se sobre a performance de rendimento e sua importância em sistemas fotovoltaicos.

3.1 Projeto do Sistema Fotovoltaico *On-Grid*

A partir de algumas estimativas necessárias, o projeto do sistema fotovoltaico conectado diretamente à rede de distribuição foi dimensionado. Os parâmetros considerados, para obter a média do consumo elétrico, foram relacionados com a região central da cidade de Arcos - MG, a qual dispõe de coordenadas 20° 16' 55" Sul, referente a latitude, e 45° 32' 22" Oeste, referente a longitude.

Para mensuração do consumo médio, foi necessária a realização de uma coleta de contas atualizadas de energia elétrica da CEMIG, entre alguns dos consumidores residenciais localizados na região central da cidade em análise. Feito isso, tem-se o acesso ao histórico de consumo de cada unidade residencial coletada, podendo verificar o consumo de energia elétrica durante o último ano e a média kWh/dia, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. Posteriormente, calculou-se a média de consumo anual e diário dos consumidores pesquisados, a fim de realizar uma estimativa.

Tabela 1 – Consumo médio das unidades consumidoras da região central de Arcos - MG.

Ano	Consumidor	Consumo Mensal (kWh)	Média Anual (kWh/ano)	Média Diária (kWh/dia)
2016	J. S.	128,25	1539	4,1725
	M. F.	71	852	2,3217
	S. M.	60,92	731	2,0125
	P. D. 1	23,583	283	0,756
	P. D. 2	32,58	391	1,0642
	P. D. 3	121,583	1459	4
	K. D.	230	2760	7,5692
	A. C.	170,17	2042	5,5817
	E. A.	325,33	3904	10,63
Soma Total		1163,416	13961	38,1078
Média para Análise		129,27	1551,22	4,2342

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Evidencia-se um consumo mínimo mensal de 30 kWh, que a CEMIG exige do cliente, ou seja, mesmo sem utilizar, a taxa mínima deve ser paga pelo mesmo. Dessa forma, deve-se retirar 1 kWh/dia na média do consumo final, uma vez que este fato não é viável ao sistema solar fotovoltaico (SILVA E CALDAS, H. H., 2016).

Dessa forma, por meio da Tabela 1, durante o ano de 2016, dentre nove consumidores pesquisados, notou-se uma média de consumo diário equivalente a 4,2342 kWh/dia, sendo que considerando a taxa mínima, esse valor reduz a 3,2342 kWh/dia. No entanto, essa média encontrada não atende a demanda de alguns consumidores, sendo necessário utilizar o maior valor, aproximado, de consumo diário e anual, equivalente a 11 kWh/dia e 4000 kWh/ano, respectivamente, para a realização dos cálculos.

O programa *SunData*, fornecido pelo CRESESB, realiza o cálculo da irradiação solar diária média mensal em determinadas cidades ou sub-regiões do Brasil. A cidade de Arcos - MG não é diretamente encontrada no programa, sendo necessária a identificação de localidades próximas, como Bambuí e Oliveira, para que sejam estimados os níveis de radiação solar incidente para a cidade em análise.

As Figuras 13 e 14 apresentam os valores dessa radiação em cada mês, bem como a média aritmética, obtida por meio do *software* Excel, resultando assim, em um gráfico de linhas, no qual os picos de melhor radiação (HSP_{ma} - horas de sol pleno diário em média) durante um ano são indicados. Esse processo foi realizado para ambas as cidades próximas de Arcos.

Mês	HSPma
Jan	5,39
Fev	5,56
Mar	5,19
Abr	4,44
Mai	4,31
Jun	4,06
Jul	4,47
Ago	4,86
Set	4,67
Out	5,19
Nov	5,11
Dez	4,86
Média:	4,8425

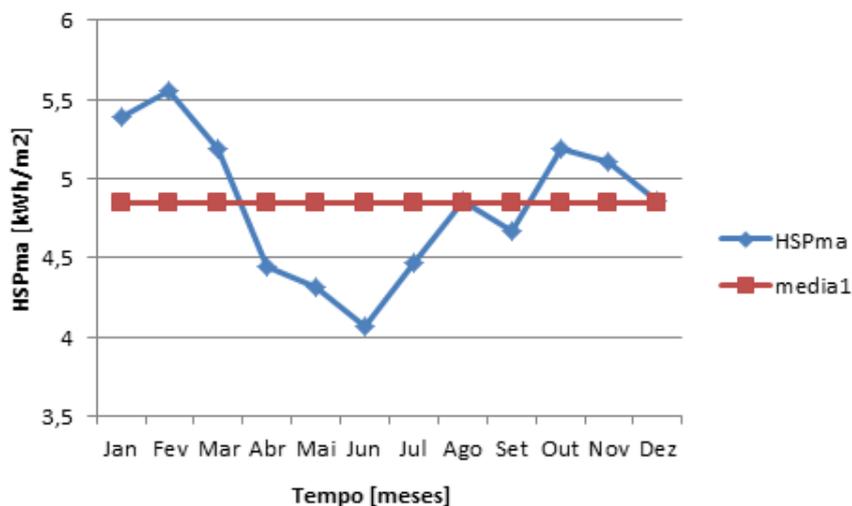


Figura 13 - Irradiação solar média na cidade de Bambuí - MG.

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Mês	HSPma
Jan	5,69
Fev	5,56
Mar	5,28
Abr	4,61
Mai	4,42
Jun	4
Jul	4,44
Ago	4,92
Set	4,83
Out	5,31
Nov	5,36
Dez	5,58
Média:	5

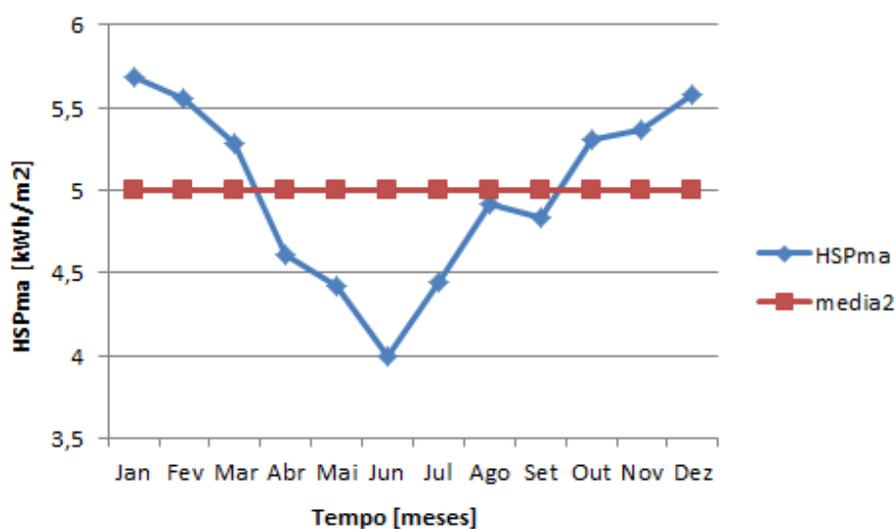


Figura 14 - Irradiação solar média na cidade de Oliveira - MG.

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

3.2 Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos

Segundo a ANEEL, considerando que os créditos gerados pelo excedente vale por um período de 60 meses, deve-se planejar uma geração inferior ao consumo residencial. Sendo assim, o sistema solar fotovoltaico proposto operaria como uma fonte complementar de geração de energia.

Primeiramente, para realizar o dimensionamento, calculou-se a potência do sistema em análise, utilizando a Equação (1) (PINHO, J. T.; GALDINO, M. A., 2014). Para esse cálculo, a performance de rendimento (taxa de desempenho do sistema) foi considerada igual a 0,75; conforme explicado, posteriormente, na seção 3.4. Essa taxa considera algumas perdas encontradas no sistema, como a eficiência do inversor, um sombreamento sobre o módulo solar e uma possível redução de potência,

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

onde:

P_{fv} – Potência de pico do sistema fotovoltaico [W];

E – Consumo diário médio da região analisada [Wh/dia];

TD – Taxa de desempenho do sistema [adimensional];

HSP_{ma} – Horas de sol pleno diário em média [kWh/m²].

A partir dos valores devidamente coletados, mensurados e citados anteriormente, determinou-se a potência gerada do sistema. Para obter o HSP_{ma} utilizado no cálculo, realizou-se uma média entre os dois valores encontrados das cidades de Bambuí e Oliveira,

$$P_{fv} = \frac{11000/0,75}{4,92125}$$

$$P_{fv} = 2980,27 \text{ W.}$$

Dessa forma, com a potência definida, foram selecionados alguns painéis solares. Essa seleção foi estabelecida por meio de verificações de diversas marcas de módulos fotovoltaicos, os mais utilizados em residências e a melhor relação custo-benefício. Sendo

assim, as especificações técnicas, apresentadas na Tabela 2, estão de acordo com o *datasheet* do equipamento escolhido (YINGLI SOLAR, 2017).

Tabela 2 – Dados elétricos do módulo fotovoltaico.

Fabricante	Yingli Solar
Modelo	YL295P-35b
Tecnologia	Silício Policristalino
Potência Nominal	295 W
Eficiência	15,2 %
Área do Pannel	1,94 m ²
Peso	25,5 kg
Tensão de Circuito Aberto - V_{oc}	45 V
Coefficiente de Temperatura da Tensão	0,32 %/°C
Vida Útil	25 anos

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Feito isso, pode-se determinar a quantidade de painéis necessários para gerar a energia suficiente ao consumo médio diário, sendo que N_{PFV} , corresponde ao número de painéis fotovoltaicos, calculado pela Equação (2),

$$N_{PFV} = \frac{P_{fv}}{P_N} = \frac{2980,27 W}{295 W} \quad (2)$$

$$N_{PFV} = 10,103 \text{ painéis.}$$

No entanto, essa quantidade não é diretamente utilizada, uma vez que o desgaste natural do módulo fotovoltaico, ao longo de sua vida útil, deve ser analisado. Neste caso, a Yingli Solar considera uma perda máxima de 20% em até 25 anos. O sistema solar fotovoltaico, proposto neste trabalho, espera que mesmo ao fim da sua vida útil, ainda continue fornecendo a energia necessária para as residências, entregando a mesma potência gerada, resultante da Equação (1).

Dessa forma, supondo uma perda linear, foi traçada, graficamente, nas Figuras 15 e 16, a potência necessária constante e a curva com perda ao longo de sua utilização, para fins

de comparação. Realizou-se esse processo para dez e onze módulos, respectivamente, uma vez que a quantidade de painéis encontrada está entre esses valores.

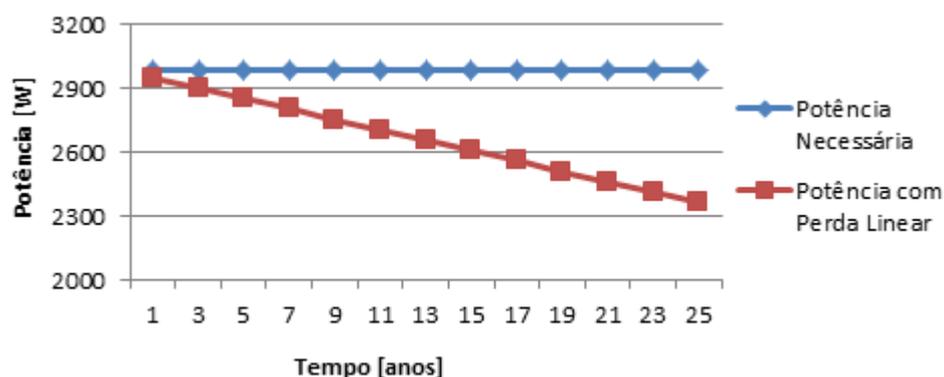


Figura 15 - Gráfico realizado no software Excel, simulação da potência utilizando dez painéis fotovoltaicos em função dos anos de funcionamento dos painéis.

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

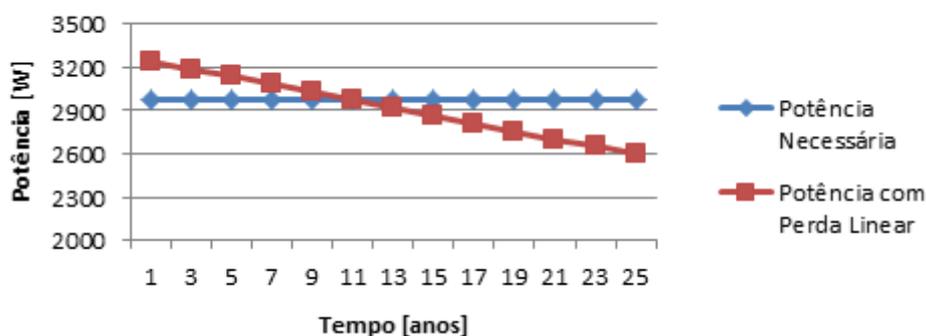


Figura 16 - Gráfico realizado no software Excel, simulação da potência utilizando onze painéis fotovoltaicos em função dos anos de funcionamento dos painéis.

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

De acordo com a Figura 15, nota-se que a energia gerada (2950 W) diminui constantemente ao longo dos anos, inviabilizando o sistema de suprir as devidas necessidades. Já na Figura 16, com a utilização de onze módulos fotovoltaicos (3245 W), o propósito da potência de 2980,27 W continuar após a vida útil do sistema, é alcançado, visando ainda um aumento de carga futura.

Na Figura 16, percebe-se também que, logo nos primeiros doze anos da instalação dos módulos, há uma geração de excedente de energia elétrica. Este excesso é injetado na rede elétrica da concessionária e o gerador individual recebe o ressarcimento na forma de créditos

acumulados. Feito isso, calculou-se a estimativa de energia gerada pelo arranjo fotovoltaico, conforme a Equação (3) (FIGUEIRA, 2014) e (SILVA E CALDAS, H. H., 2016),

$$E_{SP} = HSP_{max} \times P_{modulo} \times N_{PFV} \quad (3)$$

$$E_{SP} = 4,92125 \times 295 \times 11$$

$$E_{SP} = 15,9695 \text{ kWh/dia}$$

onde:

E_{SP} – Energia diária gerada sem perdas [kWh/dia];

HSP_{max} – Horas de sol pleno diário em média [kWh/m²];

P_{modulo} – Potência nominal do módulo solar [W];

N_{PFV} – Número de painéis fotovoltaicos.

Entretanto, essa energia encontrada não leva em conta as perdas do sistema, sendo considerado um cálculo teórico e ideal. Dessa forma, para se obter uma relação entre a geração de energia esperada e a real, torna-se necessário um cálculo de geração de energia mais efetivo, conforme apresentado na Equação (4) (MIRANDA, 2014),

$$E_{GP} = HSP_{max} \times A_{inst} \times E_f \times (1 - \rho) \quad (4)$$

$$E_{GP} = 4,92125 \times 21,34 \times 0,152 \times (1 - 0,2)$$

$$E_{GP} = 12,7704 \text{ kWh/dia}$$

onde:

E_{GP} – Energia diária gerada com perdas [kWh/dia];

HSP_{max} – Horas de sol pleno diário em média [kWh/m²];

A_{inst} – Área total a ser instalada [m²];

E_f – Eficiência do módulo solar [%];

ρ – perda percentual do sistema [%].

Em um projeto de geração fotovoltaica conectada à rede, é essencial considerar as perdas do sistema, visto que estas interferem negativamente no estudo de viabilidade

econômica. As perdas são geradas por diversos motivos, tais como, a eficiência do inversor, sujeira nos módulos, sombreamento, dados incorretos de placa, dentre outros. Dessa forma, conforme literaturas específicas, tem-se que a perda percentual total do sistema corresponde a, aproximadamente, 18% (MIRANDA, 2014).

Com o cálculo da energia diária gerada pelo sistema com e sem perdas, bem como a escolha da quantidade adequada de módulos, a determinação da área total ocupada e o peso total; os dados finais do dimensionamento proposto foram definidos, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados finais do dimensionamento proposto

Energia diária gerada sem perdas	15,9695 kWh/dia
Energia diária gerada com perdas	12,7704 kWh/dia
Número de painéis	11
Área total ocupada	21,34 m ²
Peso total	280,5 g

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Com os dados obtidos referentes aos módulos fotovoltaicos utilizados, segue-se para o próximo passo de um dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico, que é a escolha do inversor mais apropriado ao sistema, conforme algumas especificações apresentadas na próxima seção.

3.3 Dimensionamento do Inversor

Para dimensionar um inversor fotovoltaico, deve-se verificar, primeiramente, a tensão total série do sistema, segundo a Equação (5). Além disso, a tensão corrigida pelo efeito de temperatura e a potência total do sistema, também devem ser determinadas,

$$V_{ts} = V_{oc} \times N_{ps} \quad (5)$$

$$V_{ts} = 45 \times 11$$

$$V_{ts} = 495 \text{ V}$$

onde:

V_{ts} – Tensão total série dos painéis [V];

V_{oc} – Tensão de circuito aberto do painel [V];

N_{ps} – Número de módulos fotovoltaicos.

Para correção da tensão por efeito da temperatura, consideram-se valores referentes ao coeficiente de temperatura e à própria temperatura de operação, como $\beta = \frac{2,3mV}{célula.°C}$ e 47 °C, respectivamente. Por meio da Equação (6), esse resultado pode ser encontrado (SILVA E CALDAS, H. H., 2016),

$$V_{\Delta t} = V_{ts} (1 - \beta \Delta t) \quad (6)$$

$$V_{\Delta t} = 495 (1 - 0,0023x[47 - 25])$$

$$V_{\Delta t} = 469,953 V$$

onde:

$V_{\Delta t}$ – Tensão corrigida pelo efeito da temperatura [V];

V_{ts} – Tensão total série dos painéis [V];

β – Coeficiente de temperatura da tensão [mV/célula.°C];

Δt – Variação de temperatura possível [°C].

O passo seguinte é o cálculo da corrente máxima que o sistema pode suportar, conforme apresentado na Equação (7). Para tal fim, é necessária a tensão de entrada em corrente contínua e o valor da máxima potência gerada pelo sistema,

$$I_{FVMáx} = \frac{P_{TGerada}}{V_{\Delta t}} \quad (7)$$

$$I_{FVMáx} = \frac{3245 W}{469,953 V}$$

$$I_{FVMáx} = 6,905 A$$

onde:

$I_{FVMáx}$ – Corrente máxima de entrada [A];

$P_{TGerada}$ – Máxima potência gerada pelo sistema [W];

$V_{\Delta t}$ – Tensão corrigida pelo efeito da temperatura [V].

Sabendo-se todos os dados necessários, apresentados na Tabela 4, o inversor compatível com os mesmos já pode ser escolhido de forma adequada. Com a finalidade de se obterem melhores rendimentos, é útil otimizar o sistema, de forma a manter o carregamento entre 75% a 105% da potência nominal (SILVA E CALDAS, H. H., 2016).

Tabela 4 – Dimensionamento do inversor fotovoltaico.

Tensão total série dos painéis	495 V
Tensão corrigida pelo efeito da temperatura	469,953 V
Potência total do conjunto fotovoltaico	3245 W
Corrente máxima de entrada	6,905 A

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Com estes resultados, foi escolhido o Inversor Solar *Grid-Tie* B&B Moso SF5000TL, o qual suporta uma potência máxima de 5000 W, uma tensão máxima CC de 500 V e uma corrente máxima de entrada 15 A.

Para fins de comparação e obtenção de um orçamento, foi realizada ainda uma simulação, fornecida pelo *site* do “Portal Solar”, conforme apresentado na referência, de um sistema solar fotovoltaico que atenda aos requisitos citados anteriormente. No “Simulador Solar”, selecionou-se a cidade mais próxima a Arcos - MG e acrescentou-se o consumo mensal em kWh; dessa forma, foram calculados os dados necessários para o dimensionamento, obtendo os resultados apresentados na Tabela 5. A geração média mensal prevista na simulação pode ser visualizada na Figura 17 (PORTAL SOLAR, 2016).

Tabela 5 – Resultados da simulação.

Capacidade (Potência instalada)	3010 W
Produção anual de energia	4000 kWh/Ano
Área mínima ocupada pelo sistema	24,1 m ²
Peso médio por metro quadrado	15 Kg/m ²
Custo médio	R\$ 18.662,00 a R\$ 22.575,00
Quantidade de placas	12 de 260 Watts

Fonte: (PORTAL SOLAR, 2016).

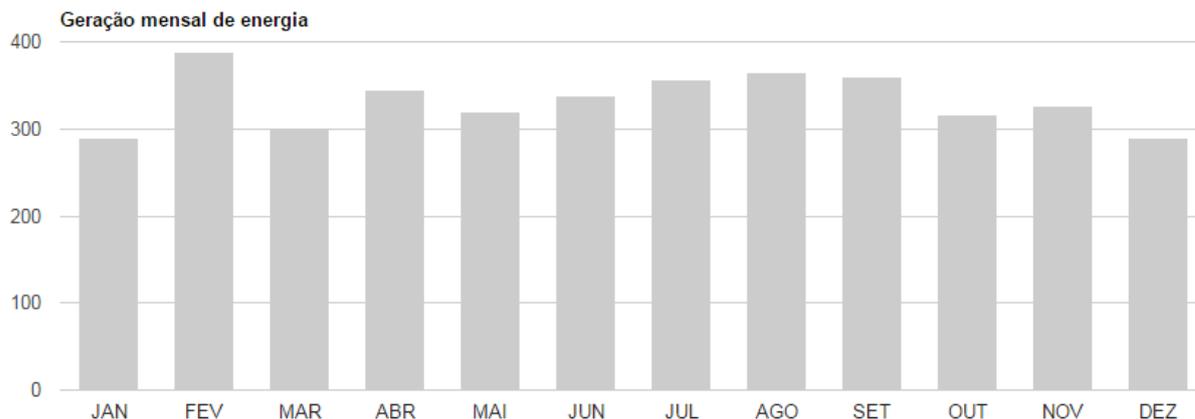


Figura 17 - Geração mensal de energia estimada (kWh) para o sistema fotovoltaico proposto.

Fonte: (PORTAL SOLAR, 2016).

Após o dimensionamento do inversor, é apresentada na próxima seção, a performance de rendimento, a qual é necessária em sistemas fotovoltaicos, principalmente no que diz respeito ao rendimento e à rentabilidade real do sistema.

3.4 Performance de Rendimento

A performance de rendimento, ou *Performance Ratio*, relaciona a produção de energia efetivamente gerada pelo sistema fotovoltaico e seu valor calculado teoricamente. Assim, tem-se um valor de referência, o qual possibilita que quaisquer sistemas fotovoltaicos possam ser submetidos à comparação (SILVA E CALDAS, H. H., 2016).

Essa relação entre o rendimento real e o teórico, resulta em uma porcentagem. Sendo assim, tem-se o valor da energia que foi gasta internamente junto com suas perdas para gerar eletricidade e o valor nominal realmente entregue ao sistema. Segundo alguns fabricantes, sistemas eficientes atingem um valor médio de 80% (SILVA E CALDAS, H. H., 2016).

O tempo ideal para analisar o desempenho de um sistema fotovoltaico é a verificação anual, notando-se perdas excessivas ou possíveis erros de instalação. O cálculo da Performance de rendimento (*PR*) é realizado conforme a Equação (8) (SILVA E CALDAS, H. H., 2016),

$$PR = \frac{\text{Rendimento Real do Sistema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right)}{\text{Rendimento Nominal do Sistema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right)} [\%]. \quad (8)$$

Neste trabalho, o sistema proposto é uma projeção teórica para instalação de módulos fotovoltaicos em unidades residenciais. Dessa forma, não será possível fazer medições periódicas para validar a performance de rendimento. No entanto, por meio das informações apresentadas no “Atlas Solarimétrico de Minas Gerais”, observou-se que o estado possui um rendimento global médio equivalente a 0,75; demonstrando uma garantia de ascensão às tecnologias fotovoltaicas. Dessa forma, esse valor foi utilizado no cálculo para determinar a potência necessária para a operação do sistema solar fotovoltaico (CEMIG, 2016).

Por fim, após a apresentação da metodologia necessária para o dimensionamento do sistema proposto, no Capítulo 4, os resultados obtidos neste trabalho de conclusão de curso são discutidos e relatados.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as estimativas do investimento total do sistema fotovoltaico proposto, bem como a análise de viabilidade do projeto considerando a energia gerada com e sem perdas do sistema, propiciando uma forma mais viável de aquisição de energia elétrica ao consumidor.

4.1 Pesquisa para Estimativa de Custo

Para a determinação dos custos envolvidos no dimensionamento do sistema proposto, nas residências da região central de Arcos - MG, foi realizada uma pesquisa do valor comercial dos painéis fotovoltaicos e dos inversores, bem como o custo da instalação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

Além disso, para calcular o valor total do investimento, deve-se considerar o valor do projeto elétrico, os encargos da empresa responsável pela instalação, o valor da interligação com a rede elétrica já existente, o painel de proteção, o custo da instalação e o custo da Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) do CREA. A Tabela 6 apresenta as taxas cobradas para cada um desses serviços, relacionando-os com o custo dos painéis fotovoltaicos e inversores previamente determinados (DASSI, 2015), (FERREIRA, 2016) e (HANDYMAN, 2016).

Tabela 6 - Levantamento de custo, de acordo com a porcentagem em relação ao valor do sistema.

Suporte de fixação de painéis	R\$ 120,00 cada
Projeto elétrico e encargos da empresa de instalação	20 % do valor (painéis + inversor)
Interligação com a rede existente	2,0 % do valor (painéis + inversor)
Painel de proteção	2,5 % do valor (painéis + inversor)
Instalação elétrica dos painéis	16,4 % do valor (painéis + inversor)
ART	40,0 % do valor (painéis + inversor)

Fonte: (FERREIRA, 2016).

Feito o levantamento de custo referente aos serviços e equipamentos necessários para a implantação do sistema, pode-se calcular o investimento total do mesmo, o qual está apresentado na próxima seção.

4.2 Investimento Total do Sistema Fotovoltaico

Baseado no contexto estabelecido na seção 4.1, determinou-se o investimento do projeto proposto, considerando o custo da utilização de onze módulos fotovoltaicos, sendo o preço unitário igual a R\$ 1.249,75 (YINGLI SOLAR, 2017). A Tabela 7 apresenta os equipamentos e serviços necessários para o dimensionamento do sistema fotovoltaico com seus respectivos custos, determinados por meio da Tabela 6, ressaltando o valor total do projeto analisado.

Tabela 7 – Estimativa do custo total do sistema solar fotovoltaico.

EQUIPAMENTOS E SERVIÇOS	CUSTO (R\$)
Módulo FV <i>Yingli</i> Solar YL295P-35b	13.747,25
Inversor Solar <i>Grid-Tie</i> B&B Moso SF5000TL	8.649,00
Suporte para fixação dos painéis	1.320,00
Projeto elétrico, encargos da empresa, ART	13.437,75
Interligação com a rede existente (Medidor bidirecional)	447,925
Painel de proteção	559,91
Instalação elétrica dos painéis	3.672,985
TOTAL (R\$)	41.834,82

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Geralmente, para mostrar uma maior atratividade em projetos que visam uma economia de gastos, utiliza-se de índices econômicos, como por exemplo, o tempo de retorno de capital, também denominado *payback*. O cálculo de *payback*, apresentado na Equação (9), indica o prazo necessário para a recuperação do capital inicial investido (FERREIRA, 2016),

$$\textit{payback simples} = \frac{I}{C_{\text{economizado}}} \quad (9)$$

onde:

payback simples – Tempo de retorno [anos];

I – Custo total do investimento do projeto [R\$];

C_{economizado} – Valor da energia gerada durante o ano [R\$/ano].

Entretanto, antes de calcular o *payback*, é necessário determinar o valor da energia gerada durante o ano, conforme apresentado na Equação (10),

$$C_{economizado} = tarifa \times E \times 365 \quad (10)$$

onde:

C_{economizado} – Valor da energia gerada durante o ano [R\$/ano].

tarifa – Valor correspondente ao kWh;

E – Energia gerada estimada [kWh].

A energia atualmente consumida pelas residências analisadas é fornecida pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Após examinar as faturas de energia elétrica, provenientes dessa concessionária, dos nove consumidores escolhidos, foi possível realizar uma média do valor correspondente ao kWh pago, sendo que o resultado encontrado foi de R\$ 0,82201794 por kWh. Dessa forma, de acordo com a Equação (10), pode-se determinar o valor da energia gerada com e sem perdas durante o ano,

$$C_{economizado \text{ sem perdas}} = 0,82201794 \times 15,96946 \times 365$$

$$C_{economizado \text{ sem perdas}} = \text{R\$ } 4.791,42/\text{ano},$$

$$C_{economizado \text{ com perdas}} = 0,82201794 \times 12,7704 \times 365$$

$$C_{economizado \text{ com perdas}} = \text{R\$ } 3.831,59/\text{ano}.$$

Após a determinação do custo total do investimento do projeto e do valor da energia gerada durante o ano, o *payback simples* foi obtido conforme a equação (9). Nota-se que esse

mesmo cálculo foi realizado tanto para a energia sem perdas quanto para a energia considerando as perdas do sistema, submetendo esses valores a uma comparação,

$$\textit{payback}_{\textit{sem perdas}} = \frac{41.834,82}{4.791,42}$$

$$\textit{payback}_{\textit{sem perdas}} = 8 \textit{ anos e } 9 \textit{ meses},$$

$$\textit{payback}_{\textit{com perdas}} = \frac{41.834,82}{3.831,59}$$

$$\textit{payback}_{\textit{com perdas}} = 10 \textit{ anos e } 11 \textit{ meses}.$$

Para comprovar o valor do *payback* encontrado, realizou-se uma projeção desse tempo de retorno, considerando para isso o custo economizado anualmente, equivalente a R\$ 4.791,42 e R\$ 3.831,59, para a energia gerada sem perdas e com perdas, respectivamente. Além disso, o investimento inicial também foi necessário na definição do fluxo de caixa do projeto. O retorno do investimento de capital ocorre quando o saldo passa de um valor “negativo” para zero. No entanto, se houver um valor seguinte e o mesmo for “positivo”, calcula-se a parte do *payback* correspondente aos meses, sendo que, para isso, divide-se o último valor “negativo” do saldo pelo custo economizado anualmente e multiplica-se por doze. Assim, tem-se o valor exato, por meio do método econômico, denominado *payback* simples.

Esse procedimento pode ser verificado nas Tabelas 8 e 9, as quais correspondem às projeções do tempo de retorno de investimento para a energia gerada pelo sistema sem perdas e com perdas, respectivamente. Nota-se que essa projeção foi realizada para quatorze anos a partir do investimento inicial, de forma que o *payback* seja analisado igualmente, comparando as energias geradas pelo sistema, considerando ou não as perdas.

Tabela 8 – Projeção de *payback* para a energia gerada, sem considerar as perdas do sistema.

Anos	Fluxo de Caixa		Saldo
	Investimento	Economia Fatura Energia Elétrica	
0	- R\$ 41.834,82		- R\$ 41.834,82
1		R\$ 4.791,42	- R\$ 37.043,4
2		R\$ 4.791,42	- R\$ 32.251,98
3		R\$ 4.791,42	- R\$ 27.460,56
4		R\$ 4.791,42	- R\$ 22.669,14
5		R\$ 4.791,42	- R\$ 17.877,72
6		R\$ 4.791,42	- R\$ 13.086,3
7		R\$ 4.791,42	- R\$ 8.294,88
8		R\$ 4.791,42	- R\$ 3.503,46
9		R\$ 4.791,42	+ R\$ 1.287,96
10		R\$ 4.791,42	+ R\$ 6.079,38
11		R\$ 4.791,42	+ R\$ 10.870,8
12		R\$ 4.791,42	+ R\$ 15.662,22
13		R\$ 4.791,42	+ R\$ 20.453,64
14		R\$ 4.791,42	+ R\$ 25.245,06

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Com os valores apresentados nas Tabelas 8 e 9, realizou-se um gráfico comparativo, o qual pode ser visualizado na Figura 18. Neste gráfico, pode-se perceber que um sistema fotovoltaico ideal, no qual a energia gerada não leva em conta as perdas presentes no sistema, possui o menor *payback*. Dessa forma, mostrou-se uma maior viabilidade econômica, visto que o tempo de retorno é menor, com uma diferença de dois anos e dois meses do outro caso. No entanto, os sistemas fotovoltaicos utilizados são reais, logo, as perdas existem e devem ser consideradas. Quando o *payback* com perdas é comparado com o tempo de vida útil dos painéis (25 anos), o tempo de retorno torna-se satisfatório, fazendo com que esse sistema seja viável economicamente.

Tabela 9 – Projeção de payback para a energia gerada, considerando as perdas do sistema.

Fluxo de Caixa			
Anos	Investimento	Economia Fatura Energia Elétrica	Saldo
0	- R\$ 41.834,82		- R\$ 41.834,82
1		R\$ 3.831,59	- R\$ 38.003,23
2		R\$ 3.831,59	- R\$ 34.171,64
3		R\$ 3.831,59	- R\$ 30.340,05
4		R\$ 3.831,59	- R\$ 26.508,46
5		R\$ 3.831,59	- R\$ 22.676,87
6		R\$ 3.831,59	- R\$ 18.845,28
7		R\$ 3.831,59	- R\$ 15.013,69
8		R\$ 3.831,59	- R\$ 11.182,1
9		R\$ 3.831,59	- R\$ 7.350,51
10		R\$ 3.831,59	- R\$ 3.518,92
11		R\$ 3.831,59	+ R\$ 321,67
12		R\$ 3.831,59	+ R\$ 4.144,26
13		R\$ 3.831,59	+ R\$ 7.975,85
14		R\$ 3.831,59	+ R\$ 11.807,44

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

Dessa forma, de acordo com a projeção realizada e a análise do gráfico comparativo, apresentado na Figura 18, o sistema solar fotovoltaico proposto, realmente, reduz os custos relacionados à energia elétrica e ainda promove uma diversificação energética, sendo viável para o período analisado, considerando os dados projetados.

O cálculo da potência do sistema fotovoltaico foi realizado levando em consideração os valores de maior demanda de energia elétrica. Assim, quando o consumo for pequeno, o sistema irá gerar um excedente que poderá gerar crédito com a concessionária de energia elétrica. Além disso, de acordo com a Resolução Normativa n° 687 da ANEEL, o *payback* do sistema pode diminuir com a geração de créditos, tornando o dimensionamento do sistema fotovoltaico proposto ainda mais viável (FERREIRA, 2016).

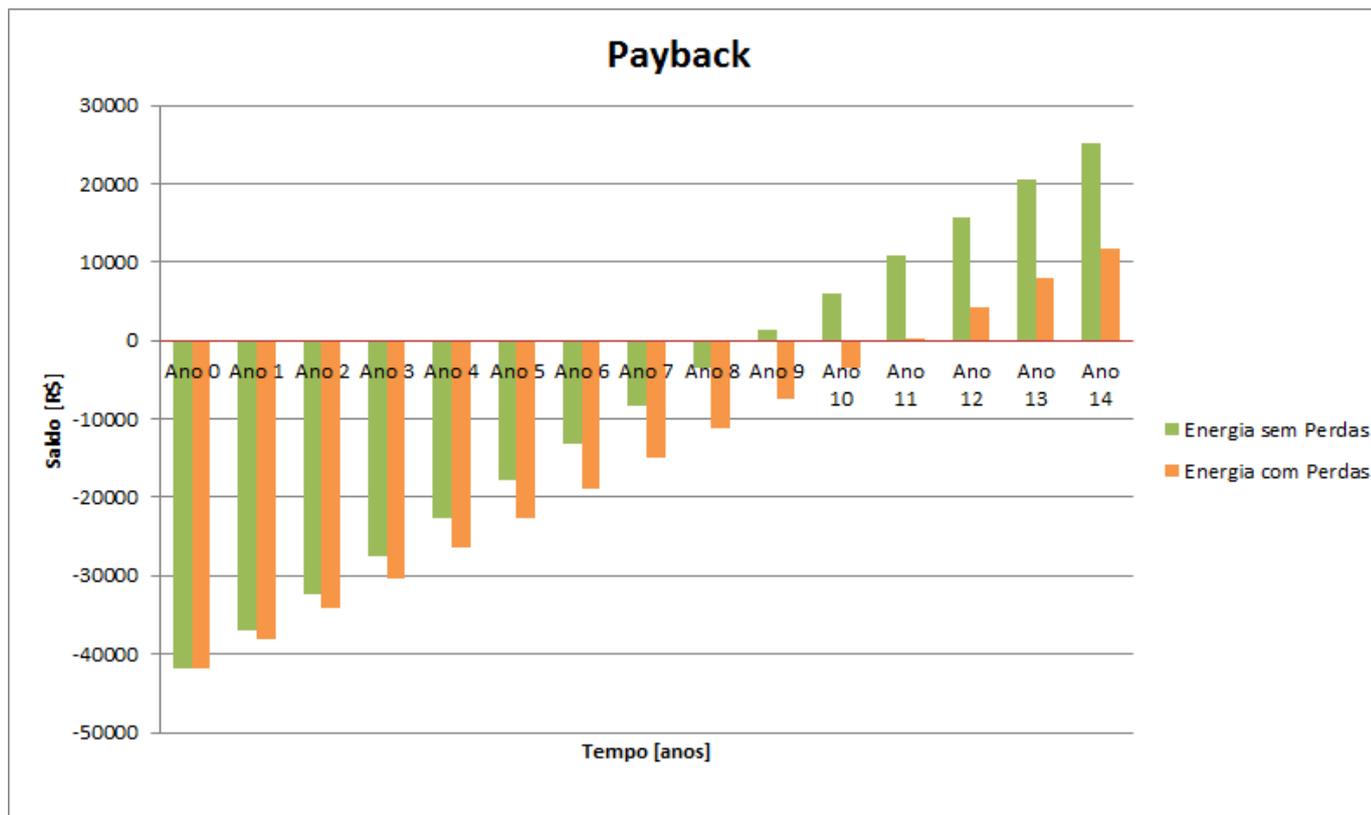


Figura 18 - Comparativo de payback entre as energias com e sem perdas do sistema.

Fonte: (Acervo do autor, 2017).

De posse de todos os resultados obtidos nessa análise de viabilidade econômica do sistema solar fotovoltaico dimensionado para a região central da cidade de Arcos - MG, são apresentadas, no próximo capítulo, as conclusões dessa monografia.

5. CONCLUSÕES

As usinas hidrelétricas são responsáveis pela maior parte de geração de energia na matriz energética brasileira. No entanto, com a diminuição das chuvas, o aumento da demanda de energia e a dependência dos fatores hídricos, fazem com que a produção dessas usinas entre em declínio, sendo necessário, o acionamento das usinas térmicas como uma alternativa ao suprimento dos consumidores. O custo da geração térmica é superior ao das hidrelétricas, acarretando um aumento considerável na conta de luz do consumidor final.

Baseado nesse contexto, a Resolução Normativa 687/2015 traz diversas melhorias para o consumidor, principalmente no que diz respeito ao sistema de compensação da energia, no qual o custo do kWh proveniente da fonte solar é comparado aos valores que o consumidor paga à concessionária pela energia elétrica.

Para a realização do estudo do dimensionamento, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica foram selecionados, visto que apresentam uma solução tecnicamente viável para o suprimento de eletricidade residencial e, garantem às unidades consumidoras, créditos em energia, sendo estes convertidos ao final do mês em redução de custos na conta de luz.

Analisou-se a geração de energia considerando as perdas do sistema e desconsiderando as mesmas, a fim de tornar os resultados mais reais possíveis. Em ambos os casos, o dimensionamento do sistema fotovoltaico, para as residências consumidoras da região central de Arcos - MG, obteve uma significativa redução de custos, segundo análise dos indicadores de viabilidade econômica. Como pode ser observado, o custo de instalação para estes sistemas ainda encontra-se em um patamar razoável, com retorno de investimento estimado de 8 a 11 anos, ou seja, apresentou-se um *payback* inferior ao tempo de vida útil dos painéis fotovoltaicos de 25 anos. Caso a energia seja comercializada com a concessionária, o *payback* diminui ainda mais, mostrando assim, que o sistema fotovoltaico proposto apresenta-se de forma viável para a média de consumo residencial de Arcos - MG.

Apesar de todos os investimentos em estudos e pesquisas nessa área, o Brasil ainda necessita de incentivos, tanto política quanto economicamente, para que se obtenha uma participação efetiva do potencial de seus recursos renováveis. Os sistemas fotovoltaicos oneram o consumidor no ato da instalação, obtendo retorno a um longo prazo, podendo isso, ser considerado uma barreira à inserção de tais sistemas, pois culturalmente, o brasileiro prefere obter resultados econômicos de curto prazo. Entretanto, esse fato ocorre, principalmente, devido à falta de incentivos e desinteresse da própria população brasileira. O

estudo realizado demonstrou que o sistema é benéfico para redução de custos de energia elétrica, mesmo perante o elevado custo de aquisição do sistema.

Por fim, conclui-se que à medida que os sistemas fotovoltaicos forem se consolidando no mercado nacional, os custos dos equipamentos se tornem mais acessíveis à população. Somando-se isto ao aumento frequente do preço da energia elétrica, espera-se ainda que o tempo de retorno dos investimentos apresente uma considerável queda. Notou-se também uma adequada viabilidade econômica para o dimensionamento do sistema fotovoltaico proposto, além da energia solar acarretar inúmeros benefícios ao meio ambiente.

6. TRABALHOS FUTUROS

As seguintes possibilidades são algumas sugestões de trabalhos futuros nessa área de energias renováveis:

- Desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para consumidores residenciais utilizando a configuração *Off-Grid*;
- Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para atender diferentes demandas, tais como, iluminação e eletrificação de zonas rurais;
- Estudo sobre a estimativa de produção de energia comparando os dois tipos de sistemas fotovoltaicos: *On-Grid* e *Off-Grid*;
- Aplicações de outros métodos de dimensionamento de módulos fotovoltaicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. **Resolução Normativa nº 687**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 25 p. 2015.
- 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.
- CÂNDIDO, D. B. **Desenvolvimento de Sistemas Estáticos Distribuídos – “Multi String”, para Aplicação em Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 2010. 149 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2010.
- CARDOSO, A. **No Ano Internacional da Luz, 1,5 bilhão de pessoas vivem no escuro pelo mundo**. Disponível em: <<http://www.ebc.com.br/tecnologia/2015/06/no-ano-internacional-da-luz-15-bilhao-de-pessoas-vivem-no-escuro-pelo-mundo>>. Acesso em: 12 de março de 2017.
- CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **Mapa atualizado do Atlas Solarimétrico**. Belo Horizonte: Cemig, 2016. 1 p. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/Mapa%20atualizado%20do%20Atlas%20Solarimetrico.pdf>. Acesso em: 06 de maio de 2017.
- COPEL. **ETC 4.15 – Especificação Técnica para Medidor Eletrônico Bidirecional**. Companhia Paranaense de Eletricidade. 11 p. 2015.
- DASSI, J. A. **Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, XXII. 2015, Foz do Iguaçu.
- ECO.A. **Radiação solar no território brasileiro**. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/arquivos/site_noticias_1909731042.jpg> Acesso em: 25 de junho de 2017.
- ENEL SOLUÇÕES. **Entenda como funciona a energia solar**. Disponível em: <<http://www.enelsolucoes.com.br/blog/2015/03/entenda-como-funciona-a-energia-solar/>>. Acesso em: 24 de março de 2017.
- ENEL SOLUÇÕES. **Benefícios da Resolução Normativa Nº 687** Disponível em: <<http://www.enelsolucoes.com.br/blog/2016/03/beneficios-da-resolucao-normativa-687/>> Acesso em: 24 de março de 2017.
- FERRAZ, C. **O avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil – Boas ou más notícias?** Grupo de Economia da Energia. Rio de Janeiro, 2016.
- FERREIRA, R. M. **Estudo de Viabilidade Econômica para Implantação de Geração Fotovoltaica em Escola Municipal de Abaeté/MG**. 2016. 73 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - IFMG. Formiga, 2016.

FIGUEIRA, Fabio Fernandes. **Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede para Alimentar a Sala de Computação da Escola Municipal Tenente Antônio João**. 2014. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FRIZON SOLUÇÕES. **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://frizonsolucoes.com.br/energia-solar-fotovoltaica/>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2017.

G1 – SÃO CARLOS E ARARAQUARA. **Bandeira vermelha na conta de luz gera alto custo a famílias e indústrias**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2015/09/bandeira-vermelha-na-conta-de-luz-gera-alto-custo-familias-e-industrias.html>>. Acesso em: 12 de março de 2017.

HANDYMAN, Mr. **Quanto custa o Sistema solar Fotovoltaico Conectado à Rede (On Grid)?**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cN7W83quv88>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

LAB SOLAR. **Condicionamento da Energia Solar Fotovoltaica para Sistemas Interligados à Rede Elétrica**. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/labsolar/2011/05/26/condicionamento/>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2017.

LEIAUT DICAS. **Associação de Painéis Solares**. Disponível em: <<https://www.leiautdicas.com/2016/01/30capitulo-associacao-de-paineis-solares/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.

LEITE, A. C. G. M. **A Sustentabilidade Empresarial, Social e as Fontes de Energias**. Boletim de Inovação e Sustentabilidade. 39 p. São Paulo, 2013.

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.

MERCADO LIVRE. **Painel Solar Yingli Centrium Energy** Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-821956647-painel-solar-yingli-centrium-energy-_JM>. Acesso em: 12 de março de 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia renovável representa mais de 42% da matriz energética brasileira**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.

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

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.

ORGIS, G. **Leilões colocam a luz do sol na matriz energética brasileira**. Gazeta do Povo/ Energia Solar. 2015.

PAC - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda por eletricidade no Brasil vai triplicar até 2050**. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/13554306>>. Acesso em: 12 de março de 2017.

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

PORTAL SOLAR. **Energia Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2017.

RIBEIRO, U. G. V. **Estudo de Viabilidade Economica de Instalação de Fontes de Energia Renováveis Baseadas em Células Fotovoltaicas Para o Uso Residencial**. 2012. 58 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

RÜTHER R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis, Brasil: 2008.

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 ENERGY. **Funcionamento da Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.sunenergy.eco.br/funcionamento.php?menu=funcionamento>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.

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

YINGLI SOLAR. **Policristalino/ Série de células YGE 72/ Datasheet**. Disponível em: <http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE72Cell-35b_40mm_BR_May%202015_YBS_Press.pdf>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.