

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

ROMULO HOFFMANN KESSLER

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA A INSTALAÇÃO DO
SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA PARA
UM COMPLEXO POLIESPORTIVO DE CURITIBA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2016**

ROMULO HOFFMANN KESSLER

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA A INSTALAÇÃO DO
SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA PARA
UM COMPLEXO POLIESPORTIVO DE CURITIBA**

Monografia de especialização apresentada ao Curso de Pós Graduação em Energias Renováveis da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

ROMULO HOFFMANN KESSLER

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA A INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA PARA UM COMPLEXO POLIESPORTIVO DE CURITIBA

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 29 de novembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

Prof.Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

RESUMO

KESSLER, Rômulo Hoffmann. **Estudo da viabilidade técnica para a instalação de um Sistema Fotovoltaico conectado a rede elétrica para um complexo poliesportivo de Curitiba.** 2016. 48 p. Monografia de especialização - Departamento acadêmico de eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta o estudo de viabilidade técnica para a instalação de um Sistema Fotovoltaico Conectado a rede elétrica em Curitiba. A base científica das informações sobre o tema é fundamentada por: literaturas, internet, dissertações e dados técnicos de fabricantes. Para tratamento de dados obtidos em campo, é utilizado um banco de dados de irradiação solar e um programa de computador que utiliza esses dados para a simulação do sistema fotovoltaico. A análise de viabilidade técnica aborda a produção de energia do sistema solar fotovoltaico como auxílio de um programa de computador e gráficos. Para a viabilidade técnica é feito o reconhecimento do local, a melhor área do telhado é eleita assim como o melhor ângulo de inclinação dos módulos, o sistema é dimensionado, atribuindo uma distribuição do arranjo de módulos, respeitando limites de tensão e corrente, o espaço disponível é averiguado e a produção do sistema fotovoltaico é simulada para confirmar se o sistema está bem dimensionado. Por fim, a viabilidade técnica é averiguada e alguns pontos em relação aos equipamentos escolhidos são discutidos.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Geração de energia. Viabilidade técnica. Energia Renovável.

ABSTRACT

KESSLER, Rômulo Hoffmann. **Technical feasibility study for installation of a grid-tied Photovoltaic System for a multisport complex from Curitiba.** 2016. 48 p. Monografia de especialização - Departamento acadêmico de eletrotécnica, Universidade Federal Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2016.

This paper presents the technical feasibility study of a grid-tied Photovoltaic System in Curitiba. The scientific basis of the information will be supported by: literatures, internet, dissertations and technical data of manufacturers. To treat the data obtained in field, will be used a solar irradiation database and a software that will use the data to simulate the photovoltaic system. The analysis of the technical feasibility will discuss the energy generation with support of softwares and graphics. For the technical feasibility recognizes the local, energy required, chooses the best part of the roof, the best tilt angle of the photovoltaic modules, scales the system, assigns a distribution of modules arrangement that respects limits of the voltage and current, ascertains if the space is enough and simulates the energy production of the photovoltaic system throughout the year to ensure if it has been sized adequately. On the final, the technical feasibility is verified and some points of the equipments selected are discussed.

Key-words: Photovoltaic solar energy. Energy generation. Technical feasibility. Grid-tied. Renewable energy.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de características de inversores para a conexão a rede come sem transformador	24
Tabela 2 – Classificação dos inversores para SFVCR.....	25
Tabela 3 – Parâmetros de potência dos inversores.	26
Tabela 4 – Parâmetros das tensões elétricas dos inversores	27
Tabela 5 – Parâmetros das correntes elétricas dos inversores.....	27
Tabela 6 – Consumo de energia.	29
Tabela 7 – Radiação global horizontal diária.....	29
Tabela 8 – Radiação diária solar no plano do sistema fotovoltaico.....	30
Tabela 9 – Dados técnicos do inversor FroniusSymo 20.0	33
Tabela 10 – Dados técnicos do módulo 260W Canadian Solar	35
Tabela 11 – Custo dos componentes.....	39

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Paineis com células de silício cristalino.....	17
Figura 2 – Paineis de silício amorfo.	18
Figura 3 – Figura física de uma estrutura pn de uma célula fotovoltaica.	21
Figura 4 – Célula solar fotovoltaica.	22
Figura 5 – Símbolo de módulo fotovoltaico.	22
Figura 6 – Elementos fotovoltaicos.	23
Figura 7 – Imagem de satélite do local demonstrando o desvio azimutal	30
Figura 8 – Imagem de satélite do local com área disponível	31
Figura 9 – Detalhe da estrutura do local	31
Figura 10 – Aba do telhado selecionada	32
Figura 11 – Inversor Fronius Symo 20.0-3-M	34
Figura 12 – Arranjo do sistema fotovoltaico	34
Figura 13 – Módulo policristalino	35
Figura 14 – Circuito do sistema fotovoltaico.....	36
Figura 15 – Área utilizada do telhado.....	38
Figura 16 – Distribuição típica dos custos	40
Figura 17 – Radiação solar diária no plano do painel (kWh/m ² .dia)	41
Figura 18 – Geração diária estimada de energia elétrica (kWh/dia).....	41
Figura 19 – Geração mensal estimada de energia elétrica (kWh/mês).....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	<i>Ampere</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BF	baixa-frequência
HF	<i>high-frequency</i>
TL	<i>transformerless</i>
Wp	<i>Wattpico</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
SFI	Sistemas fotovoltaico isolado
Pn	Potência Nominal
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
CDE	Conta do Desenvolvimento Energético
CdTe	Telureto de cádmio
EPIA	<i>EuropeanPhotovoltaicIndustryAssociation</i>
FV	Fotovoltaico
In	Corrente nominal
PLL	<i>phaselocked loop</i>
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SFVCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica
Si	Silício
V	<i>Volts</i>
Vn	Tensão nominal
W	<i>Watt</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	TEMA.....	9
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
1.3	PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.4	OBJETIVOS	10
1.4.1	Objetivo Geral.....	10
1.4.2	Objetivos específicos.....	11
1.5	JUSTIFICATIVA.....	11
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	12
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	ENERGIA RENOVÁVEL.....	14
2.2	ENERGIA SOLAR	15
2.2.1	Energia solar térmica.....	15
2.2.2	Energia solar fotovoltaica	16
2.2.2.1	Primeira geração da tecnologia fotovoltaica	16
2.2.2.2	Segunda geração da tecnologia fotovoltaica	17
2.2.2.3	Terceira geração da tecnologia fotovoltaica	19
2.3	RADIAÇÃO SOLAR.....	19
2.4	SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.....	20
2.4.1	Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica	20
2.4.2	Arranjo Fotovoltaico.....	22
2.4.3	Inversor CC-CA	23
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	LOCALIZAÇÃO.....	29
3.2	ESCOLHA DOS COMPONENTES.....	32
3.3	LEVANTAMENTO DE CUSTO	39
3.4	GERAÇÃO MENSAL.....	40
4	DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, buscam-se alternativas para a geração de energia elétrica, uma delas aparenta ter um futuro promissor, mais conhecida como energia fotovoltaica, vem crescendo ao longo dos anos. Existem diversos atrativos na tecnologia fotovoltaica, desta forma o interesse nessa tecnologia aumenta, fazendo-a prosperar e contribuir cada vez mais na matriz energética de diversos países.

1.1 TEMA

Segundo a Nota Técnica EPE/DEA n.º 019/2014, a inserção dos Sistemas Fotovoltaicos apresenta um crescimento quanto à capacidade instalada ao redor do mundo nos últimos anos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

Segundo os estudos da *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* (REN21) a potência elétrica mundial atingiu a marca de 227GWp em 2015 (REN21, 2016, p. 19). Os dados da EPIA (2014) apontam também que até o início do ano 2000 a maior parte dos Sistemas instalados eram Sistemas Fotovoltaicos Isolados da Rede Elétrica, enquanto que ao final de 2013 os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR), representavam cerca de 95% do total instalado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). O desenvolvimento da tecnologia SFVCR deve-se ao incentivo promovido por países como Alemanha, Austrália, China, Espanha, EUA, entre outros (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

É importante observar que no Brasil: “o país já possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, a melhor integração da energia solar fotovoltaica seria como uma fonte complementar, aproximando a geração do consumo e reduzindo assim perdas com transmissão” (AMÉRICA DO SOL, 2015, p. 1).

A geração de energia elétrica, por meio da tecnologia solar fotovoltaica é uma das formas de geração limpa e renovável. Destaca-se sobre outras fontes de geração pela sua “simplicidade de utilização, baixa manutenção, sem ruído, características modulares que permitem a ampliação conforme a necessidade, permitindo até mesmo que seja desmontado e remontado em outra localidade” (URBANETZ, 2015, p. 4).

O estudo de viabilidade técnica para a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede de Curitiba contribuirá para discussões sobre o uso da tecnologia de geração de energia elétrica para a matriz energética brasileira no cenário de microgeração distribuída

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo em questão, refere-se à análise de viabilidade técnica para a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica em um complexo poliesportivo, localizado na zona sul da cidade de Curitiba, estado do Paraná - Brasil.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Observa-se no complexo poliesportivo analisado, um consumo elevado com energia elétrica e neste sentido busca-se uma alternativa para a produção dessa eletricidade no próprio local de consumo, sendo a geração por fonte solar fotovoltaica uma opção a ser avaliada quanto a sua viabilidade técnica.

A escolha de equipamentos bem como do seu modo de instalação impacta na produção energética, logo estes requisitos deverão ser avaliados visando alcançar a viabilidade técnica da instalação.

1.4 OBJETIVOS

Nos tópicos a seguir, apresentam-se os seguintes objetivos para a realização do estudo:

1.4.1 Objetivo Geral

Realizar o estudo da viabilidade técnica para a instalação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica em um complexo poliesportivo localizado na cidade de Curitiba.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar o levantamento do histórico de consumo do local;
- Realizar o levantamento dos valores históricos de irradiação do local;
- Projetar o Sistema Fotovoltaico;
- Analisar tecnicamente a escolha dos equipamentos do Sistema Fotovoltaico e seu modo de instalação;
- Dissertar sobre a viabilidade da instalação do Sistema Fotovoltaico em estudo.

1.5 JUSTIFICATIVA

A escassez de chuvas tem encaminhado o País para uma situação árdua. A crise hídrica resulta em consequências tanto econômicas, quanto sociais. Diversos campos sofrem com a falta de chuva, desde a agricultura, até a geração de energia elétrica (AMARAL, 2015).

Observa-se decréscimo da participação da fonte de energia hidráulica na Matriz Elétrica Brasileira, passando dos 65,2% em 2014 para 64% em 2015 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016), impulsionada também pela crise hídrica que vem ocorrendo desde 2012, com a “redução de taxas pluviométricas em algumas regiões do país” (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2015).

A diversificação da matriz energética é necessária para minimizar os impactos negativos causados pela dependência de uma única fonte, deste modo, reduzem-se problemas e riscos, como a redução do nível de represas, diminuição sazonal da intensidade de ventos ou o consumo de uma safra agrícola. Também pode ser considerada como uma estratégia econômica, variando a escolha da fonte, de acordo com o preço mais atrativo (SILVA *et al.*, p.48).

Para fomentar a instalação distribuída utilizando fontes renováveis, instaladas na rede de distribuição a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), implantou o mecanismo para se medir a energia líquida injetada na rede de distribuição, “descontado o consumo, e utilização desse crédito no abatimento da fatura nos meses posteriores chamada de *Net Metering*” (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).

Segundo a Nota Técnica EPE/DEA n.º 019/2014, os estudos da inserção da Energia Fotovoltaica estão próximos a se realizar via geração distribuída, especialmente na autoprodução residencial e comercial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

O estudo de viabilidade técnica para uma instalação do sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica em Curitiba, evidenciará o potencial desta forma de produção energética no ambiente urbano junto ao ponto de consumo.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O propósito da pesquisa é que seja explicativa por registrar e analisar fatos, e por meio de um caso de estudo interpretá-los, verificando a sua viabilidade ou não e por fim verificando as causas para isso (CLEMENTE; SOUZA, 2008).

Serão coletados dados, como: consumo mensal dos últimos 12 meses, irradiação solar do local baseado no banco de dados Atlas Brasileiro de Energia Solar, espaço disponível para implantação do sistema fotovoltaico e as características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema de geração de energia fotovoltaica.

Baseado na quantidade de energia elétrica a ser produzida, é possível dimensionar e parametrizar dados, como, inclinação ótima, quantidade de módulos fotovoltaicos, inversores, arranjo dos módulos e dimensionamento de condutores.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 1- Introdução: tema, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa, procedimentos metodológicos, estrutura do trabalho;
- Capítulo 2 - Teoria: embasamento teórico sobre a tecnologia de geração fotovoltaica (tipos de módulos, terminologias, princípios de funcionamento);

- Capítulo 3 - Dimensionamento do sistema solar fotovoltaico, estudo de viabilidade técnica e estimativa dos custos obtidos para a instalação do sistema solar fotovoltaico;
- Capítulo 4 - Discussões e considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir, serão apresentados os tópicos relacionados ao embasamento teórico do tema proposto.

2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

De acordo com Herzog, Lipman e Kammen, (2001 p.34), fontes de energias convencionais não renováveis, como termelétricas e usinas nucleares estão fortemente ligadas ao progresso econômico, porém, ao mesmo tempo elas danificam o meio ambiente e a saúde humana. Essas fontes de energia tradicionais estão enfrentando forte pressão dos ambientalistas, principalmente agora com o Protocolo de Kyoto, que prevê a redução dos gases do efeito estufa.

A energia renovável ganha cada vez mais espaço, pois consegue, em teoria, substituir a energia não renovável, além de ter a capacidade de suprir a demanda energética do mundo. As fontes de energia renovável, como biomassa, eólica, solar, hidrelétrica e geotérmica podem fornecer serviços energéticos sustentáveis com base em recursos disponíveis na rotina de todo mundo. A cada dia que se passa, parece mais provável que a energia renovável substituirá a energia não renovável, pois os preços do petróleo e do gás tendem a aumentar e o preço dos sistemas renováveis cai ao longo das décadas. O mercado financeiro já demonstra interesse em projetos de sistemas renováveis e isso é uma evidência de que sistemas de energias renováveis são financeiramente competitivos. Além disso, esses sistemas de energias renováveis descentralizam a produção de energia, trazendo benefícios, como dispersão do impacto ambiental geralmente causado por uma grande centralização de produção de energia, como é o caso de uma usina termelétrica que polue muito o ar ao seu redor ou o caso de uma hidrelétrica que devasta uma grande área para captação de água. Esses pequenos sistemas podem ser produzidos em massa, reduzindo seu custo, além de ser totalmente personalizável para atender cargas de demanda distintas.

2.2 ENERGIA SOLAR

Basicamente, há dois modos para converter energia solar em formas de utilização comuns, são elas os módulos fotovoltaicos que convertem a energia solar diretamente em energia elétrica ou os sistemas solares térmicos que concentram a luz solar para produção de vapor que posteriormente moverá uma turbina ligada a um gerador elétrico (IRENA,2012).

2.2.1 Energia solar térmica

A energia solar térmica usa formas distintas para aquecer um fluido, que se transformará em vapor. O vapor é usado para mover uma turbina que gera eletricidade. Esses casos de geração de energia solar térmica tem uma vantagem que é o armazenamento de calor, assim, esses sistemas podem ser híbridos, junto com uma forma de gerar calor pela queima de combustíveis fósseis, por exemplo. Oferecendo uma geração, não somente durante a exposição solar, mas também durante a noite (IRENA, 2012).

As vantagens desses sistemas são a alta temperatura, que usa métodos convencionais para produzir energia, a eficiência, pois com a concentração de luz a eficiência do sistema se torna maior do que um sistema de energia solar fotovoltaica, a área pode ser coberta por materiais mais baratos, usando espelhos ao invés de células fotovoltaicas e o armazenamento de calor para produzir energia durante condições climáticas desfavoráveis. As desvantagens desses sistemas são a incapacidade de fornecer energia com luz difusa, que não pode ser concentrada e a necessidade de seguir o sol durante o dia, requerindo processos de manutenção (IRENA, 2012).

Há principalmente três tipos de sistemas de energia solar térmica, são eles: sistema concentrador de calha parabólica, sistema móvel de discos parabólicos, torre de energia solar. A calha parabólica é constituída por um refletor parabólico que concentra a luz solar em um tubo no seu centrofocal, este tubo contém fluido que será aquecido para posteriormente servir como fonte de calor em um sistema de geração de energia. O disco móvel parabólico consiste em uma parabólica espelhada com um receptor no seu ponto focal, o fluido receptor aquece, gerando energia térmica para um motor que está localizado no ponto focal, integrado ao

receptor, assim não há perdas no transporte do fluido até o motor, como no sistema de calhas parabólicas. A torre solar consiste em uma torre receptora de um grande número de espelhos concentradores, os espelhos concentram a luz solar na torre, a concentração dos raios solares na torre aquece um vapor em alta temperatura, gerando eletricidade com uma turbina (IRENA, 2012).

2.2.2 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é gerada a partir de células fotovoltaicas, que são dispositivos eletrônicos que convertem a luz diretamente em eletricidade. Inventada em 1954 pela *Bell Telephone Laboratories*. Hoje é uma das energias renováveis que mais cresce e há expectativas de que essa tecnologia seja a principal fonte de geração elétrica global no futuro. Essa tecnologia também é conhecida por ser a mais democrática, pois devido a sua modularidade, pode atender diferentes tipos de demanda energética e é um tipo de energia disponível no mundo todo, além da baixa manutenção (IRENA, 2012).

A principal aplicação da energia solar fotovoltaica foi na década de 50, quando foi usada em satélites, onde simplicidade e confiança eram de suma importância para o sistema de geração de energia para o satélite e o custo era uma preocupação secundária (A. HERZOG, T. LIMPAN e D. Kammen, 2001).

Há três gerações de tecnologia fotovoltaicas: a primeira geração que são as células de silício cristalino, a segunda geração que são as células solares de filme fino e a terceira geração que são as células orgânicas.

2.2.2.1 Primeira geração da tecnologia fotovoltaica

A primeira geração de tecnologia fotovoltaica é a das células de silício cristalino, o silício é um dos materiais mais abundantes da face da terra. Esse material é um semicondutor com excelentes aplicações fotovoltaicas, com gap de energia por volta de 1,1 eV. É o material mais usado na indústria fotovoltaica. É uma tecnologia já madura com muito conhecimento acumulado desenvolvido dentro da indústria eletrônica.

O processo de fabricação dessas células é composto por quatro passos: produção do polisilício, produção do lingote, produção das células e a produção dos

módulos. As células fotovoltaicas são classificadas quanto ao silício que é usado na sua fabricação. São eles: monocristalino e policristalino. A figura 1 mostra a tecnologia de painéis com células de silício cristalino.

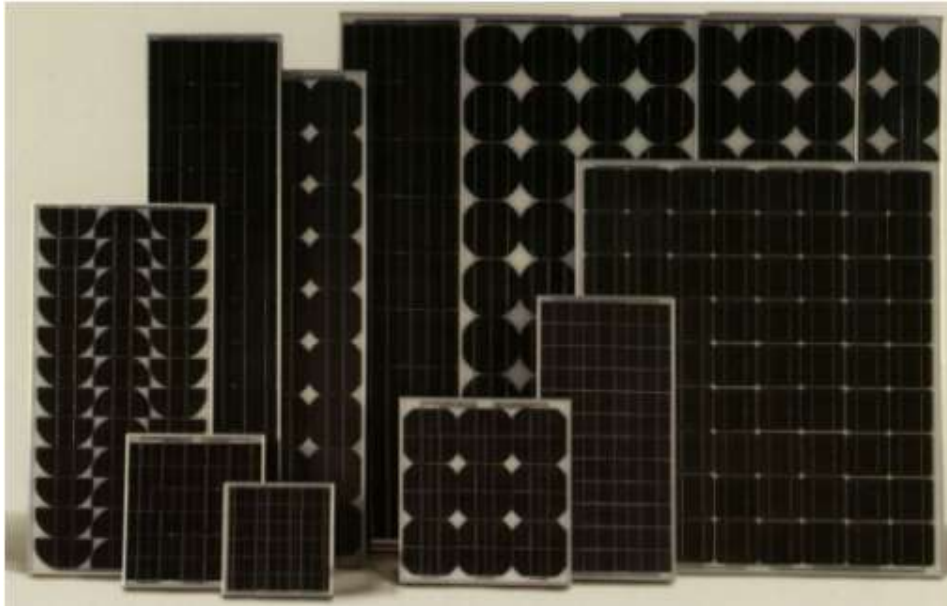


Figura 1 – Painéis com células de silício cristalino.
Fonte: RÜTHER (2004, p. 22).

A produção comercial dos módulos de silício cristalino começou em 1963, quando a Corporação Sharp do Japão começou a produzir módulos fotovoltaicos e instalou um sistema fotovoltaico de 242 Watt (W) de potência pico, a maior instalação comercial do mundo naquela época (GREEN, 2001). A tecnologia de silício cristalino foi responsável por 87% das vendas globais de sistemas fotovoltaicos no ano de 2010 (SCHOTT SOLAR, 2011). A eficiência dessa tecnologia está entre 14% e 19%.

2.2.2.2 Segunda geração da tecnologia fotovoltaica

A segunda geração da tecnologia fotovoltaica é a de células solares de filme fino que após mais de 20 anos de pesquisa e desenvolvimento, este tipo de tecnologia está sendo produzida em quantidade significativa. As películas de filme fino podem gerar um custo menor de produção que a primeira geração de tecnologia fotovoltaica. Entretanto, o baixo investimento de capital, a baixa produção e o custo do material são compensados com a baixa eficiência e como os módulos de silício

cristalino tem custo muito baixo, essa economia se torna desafiadora. Células solares de filme fino são constituídas por finíssimas camadas de 1 a 4 mm de espessura, depositadas sobre um material de baixo custo, como vidro, polímero ou metal, uma consequência é a menor utilização de material semicondutor, até 99% a menos que as células solares de silício cristalino, além disso, elas podem ser embaladas em estruturas flexíveis e mais leves, desta maneira, pode facilmente ser integrada a outras coisas. A figura 2 exibe a tecnologia de painéis com células de silício amorfo.



Figura 2 – Painéis de silício amorfo.

Fonte: RÜTHER (2004, p.25).

Os módulos de filme fino com silício amorfo tem a eficiência entre 4 e 8%, além desta desvantagem, existe um efeito que afeta os módulos de silício amorfo, que é a redução do seu poder de geração entre 15% e 35%, pois o sol degrada sua performance ao longo do tempo.

Existem outros tipos de tecnologia de módulos de filme fino, como a de telureto de cádmio (CdTe), que tem sua eficiência em até 16% e menor custo de produção (GREEN,2011). Cádmio é um subproduto da mineração de zinco e o telúrio é um subproduto da mineração de cobre. Um dos problemas é que o telúrio é produzido em quantidades bem menores que o cádmio e sua disponibilidade em longo prazo podem complicar a produção dos módulos, outro problema é que o cádmio é tóxico, complicando e até limitando suas aplicações.

2.2.2.3 Terceira geração da tecnologia fotovoltaica

Essa geração de tecnologia são as tecnologias em fase de desenvolvimento, como os concentradores fotovoltaicos, células solares sensibilizadas por corantes e células solares orgânicas.

Concentradores fotovoltaicos concentram a luz solar usando espelhos ou lentes, porém, para serem eficientes, esses concentradores devem seguir o sol, ou seja, demandam um sistema de rastreador solar, além de um sistema de arrefecimento.

Células solares sensibilizadas por corantes são interessantes, pois é a única tecnologia que imita a fotossíntese (GRÄTZEL, 1991), composto por um anodo foto-sensibilizado, um eletrólito e um catodo foto-eletroquímico. Suas vantagens são a produção com matérias de baixo custo, diferentes cores, fácil de produzir e com a combinação de materiais orgânicos e inorgânicos é capaz de manter um peso baixo. Suas desvantagens são, risco de congelamento do eletrólito em baixas temperaturas, degradação do desempenho pela exposição aos raios ultravioletas e a baixa eficiência, pois os corantes não conseguem captar uma longa faixa espectral da luz solar.

Células solares orgânicas tem custo extremamente baixo, mas não são tão eficientes, entre 4% e 5%, está emergindo um novo nicho de tecnologia, porém, tem um futuro incerto. Seu processo de fabricação é semelhante ao processo de impressão e revestimento, tendo grande potencial de produtividade, pode ser aplicado em qualquer dispositivo móvel, que é seu primeiro público-alvo, além de poder expandir a faixa de onde sistemas fotovoltaicos são aplicados atualmente. Além dessas vantagens, esse tipo de tecnologia não é tóxica.

2.3 RADIAÇÃO SOLAR

Segundo Urbantez (2015, p. 13) a radiação solar é a forma de transferência de energia proveniente do sol por ondas eletromagnéticas. Na superfície terrestre a radiação máxima é de 1.000W/m^2 .

A radiação solar pode se dividir em três tipos, sendo elas, radiação solar direta, difusa e a refletida, mais conhecida como albedo. Radiação solar direta é a radiação solar sem nenhuma influência, que chega diretamente a determinada superfície.

Radiação solar indireta é a radiação solar proveniente do céu. Albedo é a radiação refletida do chão, que sofre influencia de acordo com o tipo de superfície que a reflete.

A radiação solar pode ser medida de forma instantânea, representando a potencia por metro quadrado, que é a irradiância, medida por W/m^2 . Ou também de forma integrada, representando a energia por metro quadrado, que é a irradiação, medida por Wh/m^2 , sempre se referindo a determinado espaço de tempo.

2.4 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Apresenta-se a seguir os elementos que constituem um Sistema Solar Fotovoltaico, seus variados tipos e topologias.

2.4.1 Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica

A célula solar fotovoltaica é o elemento responsável pela transformação da radiação solar em corrente elétrica. A transformação tem o nome de efeito fotovoltaico (SOUZA, 2014).

Para detalhar o processo, tem-se o elemento químico: silício (Si), o qual necessita ser beneficiado para a fabricação de células fotovoltaicas (FV), para isso, primeiramente é transformado em cristal de silício e logo depois, realiza-se a dopagem do material para a deposição das impurezas e criação das zonas p e n. O elemento Silício ao ser dopado com o elemento fósforo obtem-se o material com carga negativa (silício tipo N). Ao realizar o mesmo processo e substituir o elemento Fósforo por Boro, obtem-seo material com carga positiva livre, as lacunas, (silício tipo P). Ao juntarem-se as duas camadas de Silício P e N, forma-se então uma junção semicondutora. O material submetido à incidência da luz solar numa junção NP de silício, recebe a energia transferida de fótons que os mesmos à transfere para seus elétrons. Os elétrons saltam da banda de valência para a banda de condução formando-se assim eletro-lacunas. Um campo elétrico é gerado na junção P-N e os elétrons fluem da camadada P para a camada N, surgem então o efeito fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014).

A figura 3 mostra a estrutura de um material recebendo incidência solar e conectado a uma carga.

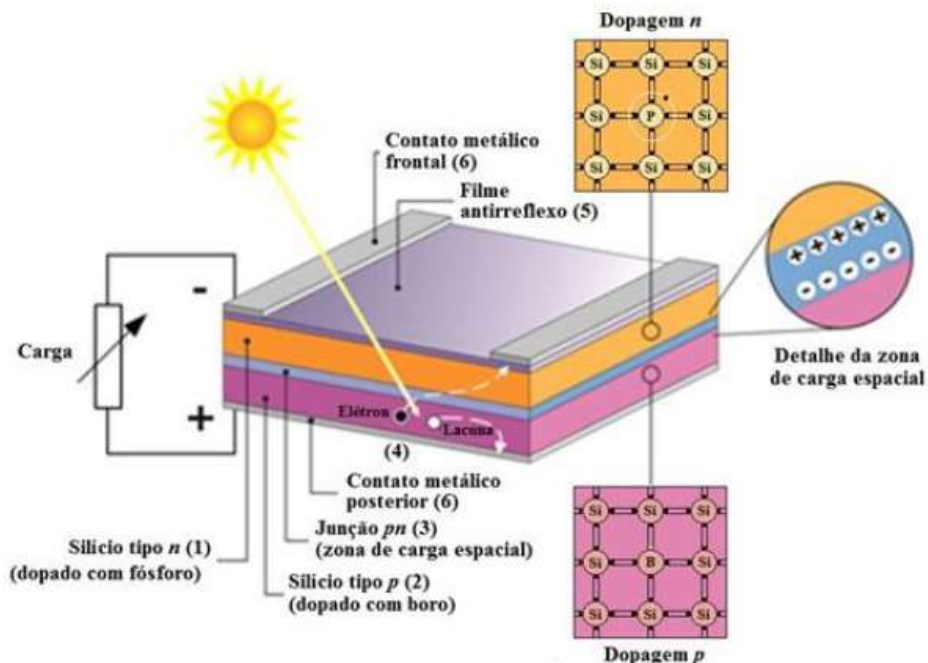


Figura 3 – Figura física de uma estrutura pn de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Pinho e Galdino (2014, p.112).

Destaca-se na figura:

- (1) – Silício tipo n
- (2) – Silício tipo p
- (3) - Junção pn, onde forma-se o campo elétrico;
- (4) – Geração de par elétron-lacuna;
- (5) – Filme antirreflexo;
- (6) – Contatos metálicos.

O silício cristalino é o material mais utilizado na tecnologia de geração de corrente, porém existem outros materiais condutores como: arseneto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio (gálio) (TIEPOLO, 2015). Uma única célula solar de silício monocristalino é exemplificada na figura 4.



Figura 4 – Célula solar fotovoltaica.

Fonte: Archiexpo (2016)

As células FV representam a parte elementar de um módulo. Quanto as suas conexões para um circuito elétrico podem ser associadas eletricamente em arranjos série ou paralelo a fim de formar um módulo fotovoltaico (URBANETZ, 2010).

2.4.2 Arranjo Fotovoltaico

Na Norma Brasileira NBR 10899:2006, consta uma gama de terminologias sobre o tema: energia solar. A NBR 10899:2006 define arranjo ou gerador fotovoltaico como: “um ou mais painéis fotovoltaicos interligados eletricamente, de modo a prover uma única saída de corrente elétrica”.

Urbanetz (2015, p.11) explica que um módulo fotovoltaico possui um conjunto de células fotovoltaicas, sendo que estas estão interligadas eletricamente e encapsuladas. A figura 5 apresenta a simbologia utilizada para o módulo fotovoltaico:



Figura 5 – Símbolo de módulo fotovoltaico.

Fonte: ABNT (2006).

A figura 6 apresenta os elementos fotovoltaicos.

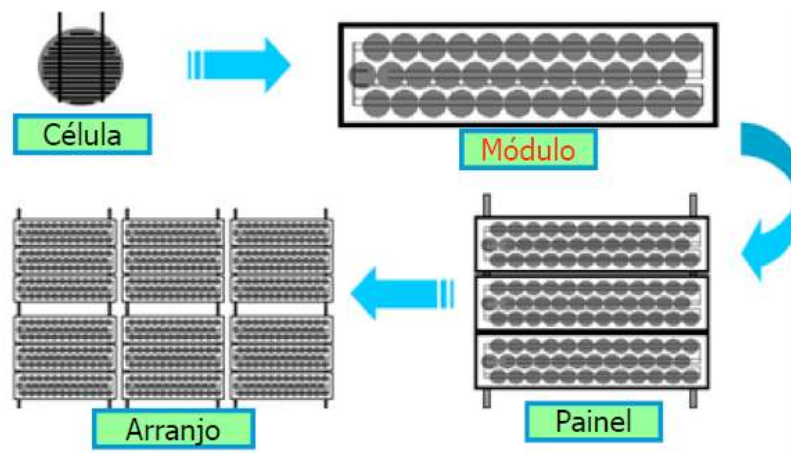


Figura 6 – Elementos fotovoltaicos.

Fonte: Urbanetz (2015).

Na Figura 6, observa-se a hierarquia dos elementos que constituem um arranjo de painéis fotovoltaicos. A célula fotovoltaica, sendo um elemento único e elementar de geração de energia; logo após tem-se os módulos fotovoltaicos onde apresenta um conjunto de células conectadas eletricamente; na sequência um painel fotovoltaico, em que se pode ter um ou mais módulos interligados eletricamente e por fim um arranjo: dois ou mais painéis fotovoltaicos agrupados com as devidas conexões elétricas.

2.4.3 Inversor CC-CA

Ruther (2004, p.30) explica que: o inversor é o equipamento responsável pela transformação da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) obtendo a tensão em corrente alternada com características necessárias para a sincronização com a rede pública de energia. Quanto ao princípio de operação, o inversor, pode ser dividido em: comutados (comutação natural) ou auto-comutados (comutação forçada). Inversores comutados recebem da própria rede elétrica o sinal para sincronismo do inversor. Geralmente o inversor autocomutado, o próprio equipamento possui um circuito, *phaselocked loop* (PLL), que controla e sincroniza o sinal do inversor ao sinal tensão ou corrente da rede elétrica de distribuição (URBANETZ, 2010, p.84).

Os inversores autocomutados podem conter um ou mais estágios. Os inversores de um estágio são robustos desempenham alta eficiência, devido ao número simplificado de componentes. Quando o inversor não possui o transformador de entrada, a tensão CC mínima para entrar em operação, equivale ao pico de tensão CA da rede ou até mesmo ao dobro de tensão da rede elétrica. A necessidade da inclusão de um transformador de alta frequência se faz necessário para a criação do isolamento galvânico entre o lado CC para o lado CA (PINHO; GALDINO, 2014).

Para Gazoli, Villalva, Guerra (2012, p.42) os inversores com transformador de baixa-frequência (BF), são mais eficientes e mais comuns no mercado. Apresentam maior volume e peso em comparação aos inversores com transformador de *high-frequency* (HF), devido à presença de um transformador toroidal. Os inversores de alta-frequência, geralmente são mais compactos e leves. Outra classificação quanto ao tipo de isolamento dos inversores chama-se *transformerless* (TL), ou seja, sem transformador, logo esse equipamento torna-se mais leve do que os outros dois já apresentados anteriormente. A tabela 1 apresenta a comparação e cita algumas características de inversores para a conexão à rede com e sem transformador.

Tabela 1 – Comparação de características de inversores para a conexão a rede com e sem transformador

Com transformador	Sem transformador
<ul style="list-style-type: none"> - maior peso e volume; - maiores perdas (magnéticas e ôhmicas) o que resulta em menor eficiência; - permite que o painel fotovoltaico opere numa tensão baixa; - menor interferência eletromagnética; - os circuitos CC e CA são isolados; - menores requisitos de operação. 	<ul style="list-style-type: none"> - menor peso e volume; - maior eficiência, principalmente se não possuir estágio de conversão CC-CC (para isso tem que operar com faixa de tensão do gerador fotovoltaico superior a tensão de pico da rede); - maior interferência eletromagnética; - necessária a instalação de dispositivos de proteção adicionais, devido à falta de isolamento entre os circuitos CC e CA.

Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Segundo Pinho e Galdino, (2014, p. 236) uma possível classificação dos inversores SFVCR, resume-se conforme a tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos inversores para SFVCR.

Inversor SFVCR	Aplicações e características
Inversor de Centrais	Inversores trifásicos de grande porte, com potência que vai de centenas de KWpico (Wp) até MWp, utilizados em Usinas Fotovoltaicas.
Inversor Multistring	Inversores trifásicos ou monofásicos dotados de várias entradas independentes com <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT) para conexão de strings (fileiras) de módulos. São adequados a instalações urbanas (telhados ou fachadas) nas quais cada <i>string</i> , pode estar submetida a diferentes condições de irradiância e/ou sombreamento. Tem potência na faixa de dezenas de KWp.
Inversor de String	Inversores monofásicos dotados de apenas uma entrada MPPT, adequados à instalações de microgeração (até 10KWp).
Módulo CA	Módulo fotovoltaico associado a um microinversor.

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

O inversor do SFVCR recebe a energia diretamente dos módulos FV em CC e sua saída é conectada em paralelo com a conexão de energia elétrica da rede da instalação. Já os inversores utilizados em Sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) recebem energia em CC de um banco de bateria onde as mesmas são alimentadas ou carregadas por um sistema FV. Sua saída de tensão é uma onda senoidal que não possui referência externa de tensão (URBANETZ, 2010).

O MPPT é um recurso presente na maioria dos inversores para sistemas fotovoltaicos. Mesmo que o arranjo FV não esteja recebendo valores significativos de irradiação solar para a operação do sistema, o circuito visa buscar a máxima potência para a geração de energia. Essa característica rastreia o ponto de máxima potência, produzida pelos módulos garantindo dessa forma a operação do sistema independentemente das condições de temperatura e irradiação solar (VILLALVA, 2012).

Urbanetz (2015) relaciona na Tabela 3, potência, Tabela 4, tensão, e Tabela 5, corrente, os parâmetros elétricos dos inversores CC-CA, que se fazem necessários na escolha do equipamento.

Tabela 3 – Parâmetros de potência dos inversores.

Potências			
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Descrição
Potência Nominal	Pn DC	W	Potência do painel fotovoltaico para a qual é dimensionado o inversor.
Potência Máxima do Painel Fotovoltaico	Pn DC máx.	W	Máxima potência do Painel Fotovoltaico que é admissível pelo inversor.
Potência Nominal AC	Pn AC	W	Potência AC que o inversor pode fornecer permanentemente.
Máxima Potência AC	PAC máx.	W	Máxima potência AC do inversor.
Potência em <i>stand-by</i>	<i>P stand-by</i>	W	Específica a potência do inversor em modo <i>stand-by</i> , quando não está em operação e fora do período noturno.

Fonte: Urbanetz (2015).

Tabela 4 – Parâmetros das tensões elétricas dos inversores

Tensões			
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Descrição
Tensão Nominal	Vn DC	Volts (V)	Tensão do painel fotovoltaico para a qual é dimensionado o inversor.
Intervalo de Tensão MPPT	Vmppt	V	Especifica o intervalo de tensão de entrada no qual o inversor procura o ponto MPP.
Tensão máxima DC	VDC máx.	V	Tensão do painel fotovoltaica máxima na entrada do inversor.
Tensão de desligamento	VDC off	V	Tensão do painel fotovoltaico mínima para qual o inversor ainda opera.
Tensão nominal AC	Vn AC	V	Tensão de saída AC do inversor (normalmente 230V).

Fonte: Urbanetz (2015)

Tabela 5 – Parâmetros das correntes elétricas dos inversores

Correntes			
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Descrição
Corrente Nominal DC	In DC	I	Corrente do painel fotovoltaico para a qual é dimensionado o inversor.
Corrente Máxima DC	Idc máx.	I	Corrente máxima do painel fotovoltaico na entrada do inversor.
Corrente Nominal AC	In AC	I	Corrente AC que é injetada pelo inversor na rede à potência nominal.
Corrente Máxima AC	IAC máx.	I	Corrente máxima AC do inversor.

Fonte: Urbanetz (2015)

O inversor utilizado em SFVCR possui características específicas visam atender as exigências e necessidades da concessionária em termos de segurança e qualidade de energia (PINHO; GALDINO, 2014). Gazoli, Villalva, Guerra (2012, p.38) resalta a devida importância do recurso *anti-islanding* (anti-ilhamento) no qual consiste em desconectar o inversor da rede elétrica, interrompendo assim o fornecimento de energia. O recurso se faz de suma importância, pois garante a segurança das pessoas, equipamentos e instalações.

A Resolução Normativa: 687/2015 à qual altera a Resolução Normativa 482/2012, inclui em seu texto o item 4.3.1:

Para o caso de sistemas que se conectam à rede por meio de inversores, o acessante deve apresentar certificados atestando que os inversores foram ensaiados e aprovados conforme normas técnicas brasileiras ou normas internacionais, ou o número de registro da concessão do Inmetro para o modelo e a tensão nominal de conexão constantes na solicitação de acesso, de forma a atender aos requisitos de segurança e qualidade estabelecidos nesta seção (ANEEL, 2015).

3 DESENVOLVIMENTO

Urbanetz, (2015, p.1) recomenda, para se iniciar o estudo de dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede deve-se realizar o levantamento histórico de consumo de energia. Na tabela 6, esses dados são demonstrados:

Tabela 6 – Consumo de energia.

Mês	04/16	03/16	02/16	01/16	12/15	11/15	10/15	09/15	08/15	07/15	06/15	05/15	Média
Consumo (kWh)	2047	1617	1650	734	2348	2189	2107	2236	2488	2522	2418	2527	2073

Fonte: o autor (2016).

Para este projeto, procura-se visar: a máxima energia gerada ao longo do ano não havendo preocupação com os meses de menor incidência.

Logo, tem-se definido a quantidade de energia a ser gerada para o projeto. A média desse histórico é de 2.073 kWh/mês, ao longo de 12 meses, não será descontado o valor de 100kWh/mês por representar menos de 5% do montante de energia necessária a ser produzida.

3.1 LOCALIZAÇÃO

A necessidade do levantamento da radiação global para as coordenadas geográficas do local que para este estudo tem-se: latitude de 25°30' sul e longitude de 49°15' oeste. A partir dessas informações, consegue-se obter a média de incidência de radiação solar ao longo dos meses do ano em um ponto bem próximo do local onde o sistema fotovoltaico será instalado, consultando a base de dados do Atlas Brasileiro de energia solar, fornecido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

O ponto mais próximo que consta na base de dados do INPE é a coordenada geográfica com latitude 25°33' sul e longitude de 49°18' oeste, a média diária de incidência de radiação solar ao longo dos meses é descrita na Tabela 7:

Tabela 7 – Radiação global horizontal diária.

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
kWh/m ² .dia	5,63	5,5	5,08	4,09	3,29	3,08	3,31	4,18	4,28	4,99	5,97	5,92

Fonte: PEREIRA *et al.*, 2006.

O local tem um desvio azimutal de 26° para a oeste em relação ao norte, assim, os valores de irradiação foram corrigidos com o uso do software, RADIASOL, e o ângulo de inclinação também foi ajustado para 22°. Este ângulo foi obtido variando-se grau a grau, a fim de proporcionar a maior média anual de irradiação solar, visando a redução de custo do sistema. Assim os valores de irradiação solar no plano do sistema estão descritos na tabela 8:

Tabela 8 – Radiação diária solar no plano do sistema fotovoltaico.

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média
kWh/m ² .dia	5,511	5,499	5,294	4,448	3,711	3,625	3,881	4,737	4,523	5,069	5,856	5,746	4,825

Fonte: a autor (2016).

Como visto na tabela 8, o valor de 4,825 kWh/m².dia é a irradiação média diária ao longo do ano e que a média mensal de energia a ser suprida ao longo do ano é de 2.073kWh/mês, como visto na tabela 6, considerando que o mês tem em média 30 dias, a energia a ser gerada diariamente corresponde a 69,1 kWh/dia.

$$E_{diaria} = \frac{E_{mensal}}{30} = \frac{2073kWh/mês}{30 \text{ dias/mês}} = 69,1kWh/dia \quad (1)$$

Para melhor exemplificação do local, tem se a figura 7 a seguir:

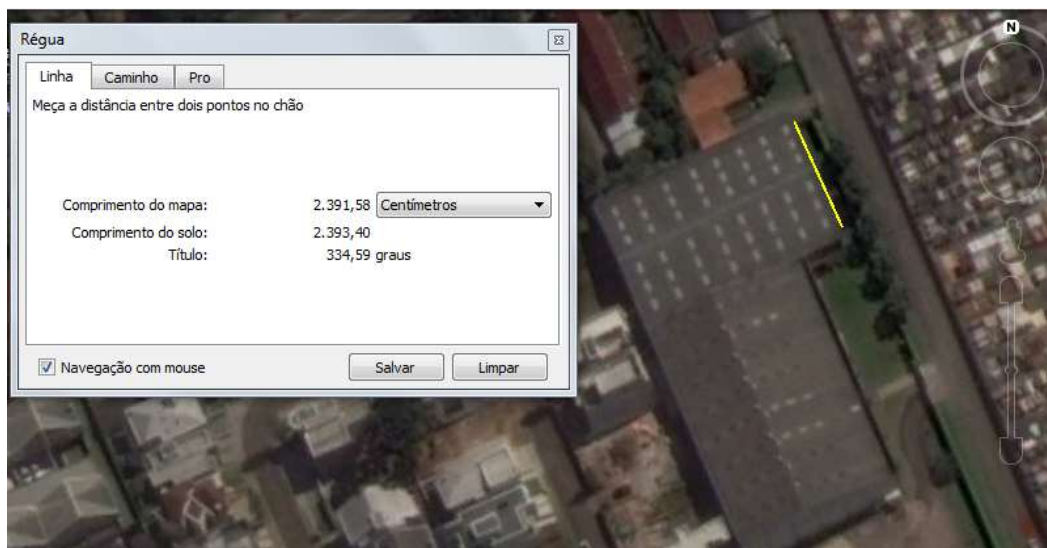


Figura 7 – Imagem de satélite do local demonstrando o desvio azimutal

Fonte: Captura de tela do Google earth (2016).

A área total de telhado é superior a 3.000m², como pode ser vista na figura 8, uma área grande como esta não restringe o tipo de tecnologia quanto ao quesito de área disponível para instalação.

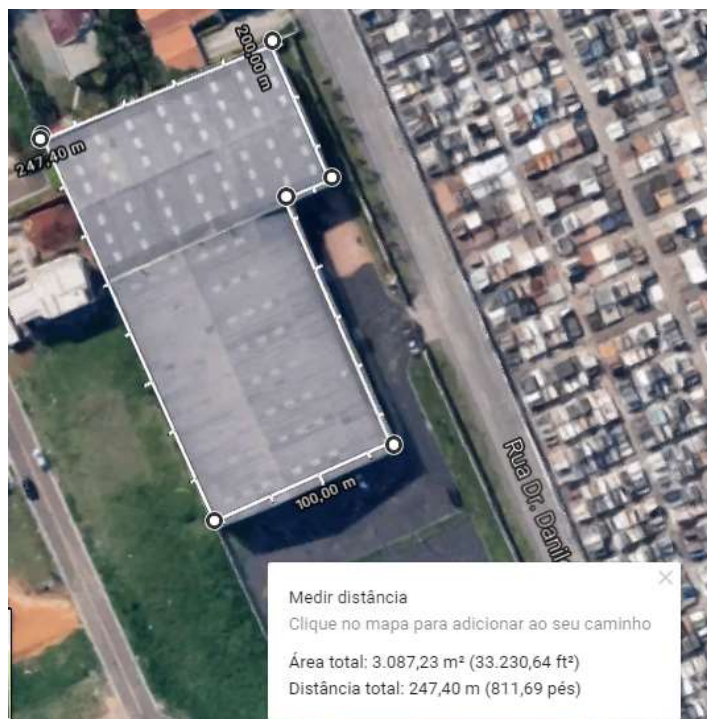


Figura 8 – Imagem de satélite do local com área disponível

Fonte: Captura de tela do Google maps (2016).

A figura 9 mostra a estrutura do telhado, composto por folhas de fibrocimento e vigas de concreto.



Figura 9 – Detalhe da estrutura do local

Fonte: o autor (2016).

A aba do telhado selecionada para o projeto é demonstrada na figura 10:



Figura 10 – Aba do telhado selecionada

Fonte: Captura de tela do Google maps (2016).

Esta aba apresenta melhor orientação para o norte do que as outras, além de uma inclinação favorável, ela também dispõe de uma área de aproximadamente 675 m², com dimensão de 15 metros de comprimento e 45 metros de largura.

3.2 ESCOLHA DOS COMPONENTES

Primeiramente, para escolher os componentes é necessário descobrir a potência total demandada.

A potência do sistema é calculada da seguinte maneira:

$$P_{fv} = \frac{E.G}{H_{TOT.PR}} = \frac{69,1 \text{ kWh.dia} \times 1 \text{ kW/m}^2}{4,825 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot \text{dia} \times 0,75} = 19,095 \text{ kW} \quad (2)$$

Onde:

P_{fv} é a potência do sistema;

E é a energia a ser gerada;

G é a irradiância a condição STC(1.000W/m²);

H_{TOT} é a irradiação no plano do sistema;

PR é a taxa de desempenho do sistema, segundo Urbanetz (2015, p. 37) a taxa de desempenho é geralmente situada entre 70% e 80%, neste trabalho foi adotado PR = 75%.

Portanto, a potência do sistema deve ser de 19.095 W, para suprir a necessidade energética do consumidor, de acordo com o seu perfil de consumo.

Como a potência do sistema fotovoltaico tem que ser de 19.095 W, a potência total deve ser dividida pela potência de um módulo fotovoltaico para determinar a quantidade de módulos necessários para atingir a potência total do sistema. Um módulo tem potência de 260W. Portanto:

$$Q_{\text{módulos}} = \frac{19095 \text{ W}}{260 \text{ W}} = 73,44 \quad (3)$$

A quantidade calculada é de 74 módulos, gerando então, um total de 19240 W de potência, 145W acima do previsto, porém, Urbanetz(2015, p. 45)é recomendável que o número de módulos seja par ou múltiplo de 3 para uma melhor configuração do arranjo do sistema.

O inversor deve suportar 19.240 W de potência, portanto, o sistema é composto por 1 inversor FroniusSymo20.0-3-M, que de acordo com a fabricante suporta até 20.000W de entrada. A tabela 9 demonstra os dados técnicos do inversor.

Tabela 9 – Dados técnicos do inversor FroniusSymo 20.0

Dados técnicos	FroniusSymo20.0
Potência do sistema recomendada	20.000Wp
Corrente de entrada(1/2)	33A / 27 A
Corrente CC máxima (1/2)	49.5 A / 40.5 A
Tensão de operação	200 – 1000 V
Tensão máxima de entrada	1000 V
Conexão a rede	3~NPE 380 V / 220 V (+20 % / -30 %)
Tensão nominal de entrada	600 V
Tensão de trabalho do MPP	420 – 800 V
Número de rastreadores MPPT	2
Eficiência máxima	98,1 %
Numero de conexões CC	3 + 3
Design do inversors	Sem transformador

Fonte: Fronius (2016).

A figura 11 ilustra o inversor FroniusSymo 20.0-3-M:



Figura 11 – InversorFroniusSymo 20.0-3-M

Fonte:Fronius.

O sistema de 74 módulos será distribuído da seguinte forma. O arranjo do sistema é de 1 inversor com 2 MPPTs conectados, sendo 1 MPPT conectado a um arranjo de 18 módulos em série em paralelo com outro arranjo de 18 módulos em série. O outro MPPT será conectado a um arranjo de 19 módulos em série em paralelo com outro arranjo de 19 módulos em série. A figura 12 ilustra o arranjo físico do sistema fotovoltaico:

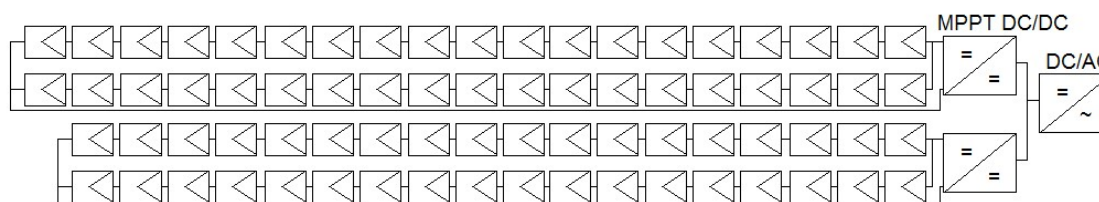


Figura 12 – Arranjo do sistema fotovoltaico

Fonte: O autor(2016).

O módulo fotovoltaico de 260W é da empresa Canadian Solar, representado pela figura 13:



Figura 13 – Módulo policristalino

Fonte: Canadian Solar

O módulo CS6P-P tem as seguintes especificações técnicas, de acordo com a tabela 10:

Tabela 10 – Dados técnicos do módulo 260W Canadian Solar

Potência Máxima	260W
Tolerância máxima	0 a +5%
Eficiência	16,16%
Tensão em circuito aberto	37,5 V
Tensão de pico	30,4 V
Corrente de curto circuito	9,12 A
Corrente de pico	8,56 A
Tensão máxima do sistema	1000 V
Comprimento	0,982 m
Largura	1,682 m

Fonte: CanadianSolar (2016).

Os circuitos do sistema fotovoltaico são representados pela figura 14:

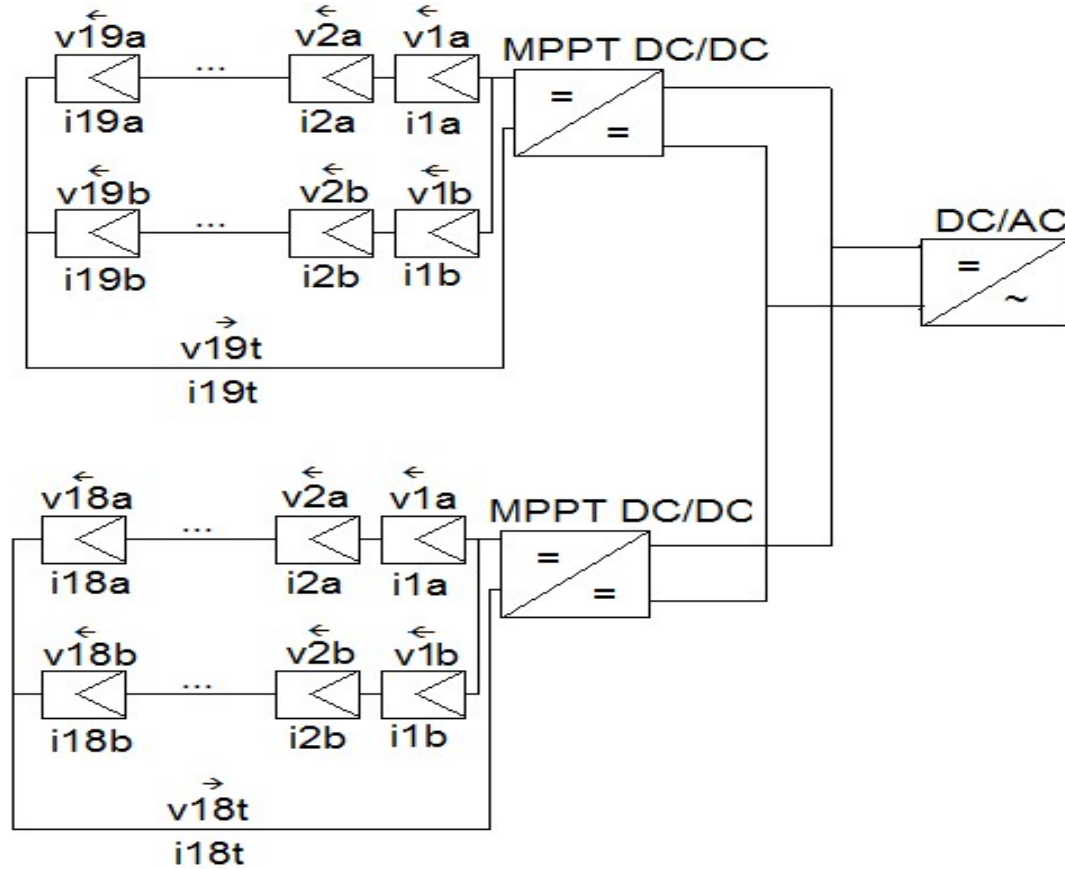


Figura 14 – Circuito do sistema fotovoltaico

Fonte: O autor (2016).

Para cada arranjo de 18 módulos, a tensão em circuito aberto do arranjo é de:

$$V_{18t} = V_{18b} = V_{18a} = 37,5 \times 18 = 675 \text{ V.} \quad (4)$$

Para cada arranjo de 19 módulos em série, a tensão em circuito aberto:

$$V_{19t} = V_{19b} = V_{19a} 37,5 \times 19 = 712,5 \text{ V.} \quad (5)$$

Ambos os arranjos respeitam a tensão máxima do circuito de módulos, que consta na tabela 10, e de entrada do inversor de 1.000V, que consta na tabela 9.

Para atender a faixa de tensão MPP, que consta na tabela 9, o arranjo deve ter sua tensão entre 420V a 800V. Logo, para cada arranjo de 18 módulos produz:

$$V_{18t} = V_{18b} = V_{18a} = 30,4 \times 18 = 547,2 \text{ V.} \quad (6)$$

Para cada arranjo de 19 módulos, a tensão é:

$$V_{19t} = V_{19b} = V_{19a} = 30,4 \times 19 = 577,6 \text{ V.} \quad (7)$$

Ambos os arranjos atendem a faixa de tensão MPP do inversor.

Devido à associação dos arranjos em paralelo, a corrente de curto circuito de ambos os arranjos é:

$$I_{18t} = I_{19t} = 9,12 \text{ A} \times 2 = 18,24 \text{ A} \quad (8)$$

Atendendo a corrente de curto circuito máxima dos MPP, que consta na tabela 9, de 49.5A e 40.5A.

A associação dos arranjos também deve respeitar a corrente de entrada máxima I_{dc} das duas entradas. A corrente máxima dos arranjos é:

$$I_{18t} = I_{19t} = 8,56 \text{ A} \times 2 = 17,02 \text{ A.} \quad (9)$$

Respeitando a corrente máxima de entrada I_{dc} do inversor, que consta na tabela 9,, que é de 33A para uma entrada e de 27A para a outra entrada.

A área total ocupada pelos módulos é de:

$$A_{\text{Módulos}} = \text{Quantidade} \times \text{Largura} \times \text{Comprimento} = 74 \times 0,982 \times 1,682 \cong 122 \text{ m}^2. \quad (10)$$

A figura 15 exibe uma prévia da área a ser utilizada do telhado pelos painéis fotovoltaicos.



Figura 15 – Área utilizada do telhado

Fonte: Captura de tela do Google maps (2016).

Essa prévia já leva em consideração folga entre os painéis, considerando duas fileiras de 37 módulos um ao lado do outro, tendo uma folga de aproximadamente 2centimentros por largura e outra folga de 30 centímetros de comprimento. Essas duas fileiras de 37 módulos totalizam os 74 módulos.

O dimensionamento dos condutores CC e CA também devem ser levados em consideração, neste dimensionamento de condutores, o método utilizado foi de queda de tensão.

A área de secção transversal dos condutores é obtida da seguinte maneira:

$$S_{cond} = \frac{2.I.P.0,0178}{V^2.\Delta V} . 100 \quad (11)$$

Sendo:

S_{cond} a área da seção transversal do condutor, em mm^2 ;

l_0 comprimento do condutor, em metros;

Potência, em *watts*;

V_a tensão do barramento, em *volts*;

ΔV_a queda de tensão admitida, em porcentagem.

Para o lado CC, admite-se igual a 80 metros e para o lado CA, admite-se igual a 45 metros. Assim, obtem-se os seguintes resultados para o lado CC e lado CA, respectivamente:

$$S_{condCC} = \frac{2m.80 \cdot 38.260w.0,0178}{(547V)^{2.4}} \cdot 100 = \frac{2813824}{1197711,36} = 2,34 \text{ mm}^2 \cong 4 \text{ mm}^2 \quad (12)$$

Arredondado para 4 mm^2 , pois é o mínimo aceitável.

$$S_{condCA} = \frac{2m.45m.74.260w.0,0178}{(380V)^{2.4}} \cdot 100 = \frac{3082248}{577600} = 5,33 \text{ mm}^2 \cong 6 \text{ mm}^2 \quad (13)$$

3.3 LEVANTAMENTO DE CUSTO

Como os componentes, assim como a quantidade, já foram escolhidos no capítulo 3.2, uma pesquisa aponta os custos dos equipamentos para a instalação, de acordo com a tabela 11.

Tabela 11 – Custo dos componentes

Componente	Quantidade	Custo unitário	Custo total
Inversor FroniusSymo 20.0-3-M	1	R\$ 26.486,40	R\$ 26.486,40
Módulo Solar Fotovoltaico Canadian CS6P-260P	74	R\$ 863,04	R\$ 63.864,96
Módulos e inversor	-	-	R\$ 90.351,36

Fonte: Neosolar

Rüther (2004, p. 43), demonstra que o valor do inversor e dos módulos, representam 75%, do valor total do sistema, os outros 25% são compostos de, 10%, que são os componentes, comocabos, conectores, estruturas de fixação e proteções, os outros 15% é o custo relativo à mão de obra da instalação do sistema, como mostra a figura 16.

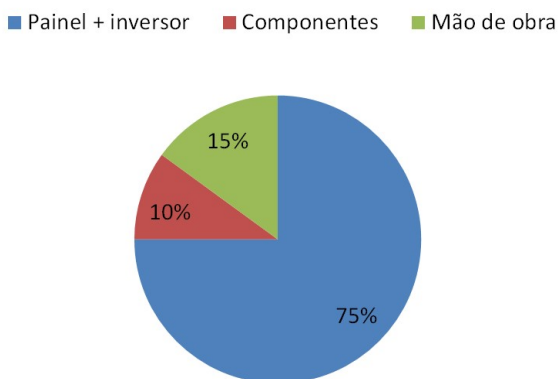


Figura 16 – Distribuição típica dos custos

Fonte: Ruther, 2004 (adaptada).

Portanto, o valor total estimado é de:

$$V_{total} = \frac{V_{módulo} + V_{inverso}}{0,75} = \frac{90.351,36}{0,75} = R\$120.468,50 \quad (14)$$

O valor estimado por W_p instalado é de:

$$V_{Wp} = \frac{R\$120.468,50}{19240Wp} = 6,26R\$/Wp \quad (15)$$

3.4 GERAÇÃO MENSAL

Para simular a geração mensal, o programa Radasol foi usado, levando em conta as coordenadas geográficas do local, o desvio azimutal em relação ao norte, assim como o melhor ângulo para geração.

A seguir, a figura 17 mostra a radiação solar diária média no plano do painel fotovoltaico, ao longo dos meses do ano.

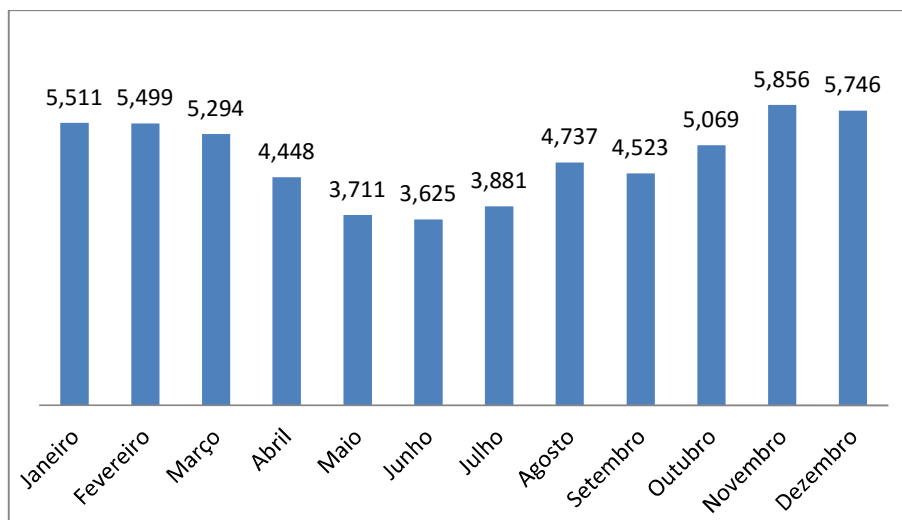


Figura 17 – Radiação solar diária no plano do painel (kWh/m².dia)

Fonte: O autor, 2016.

Com base nos valores de irradiação de cada mês, da potência total fotovoltaica instalada e da taxa de desempenho do sistema (PR = 75%) é possível estimar a produção mensal de energia, com a equação 16:

$$E = \frac{P_{fv} \cdot H_{TOT} \cdot PR}{G} \quad (16)$$

A figura 18 mostra a estimativa de produção diária de energia ao longo dos meses do ano.

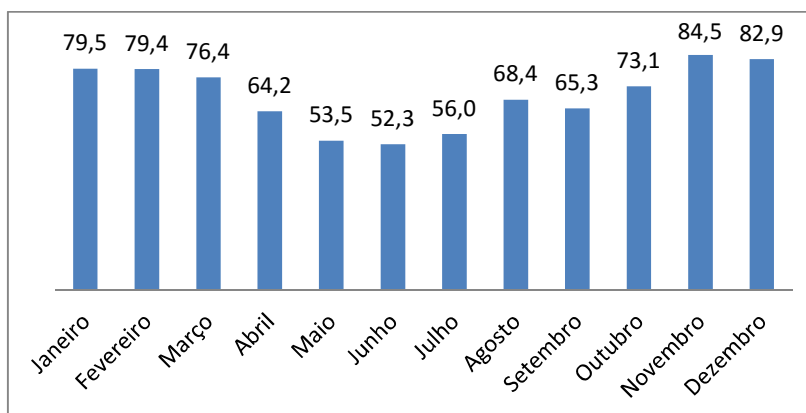


Figura 18 – Geração diária estimada de energia elétrica (kWh/dia)

Fonte: O autor (2016).

A média de geração diária ao longo do ano é de 69,62 kWh/dia, a proposta inicial de geração diária era de 69,1 kWh/dia.

A figura 19 mostra a estimativa de produção mensal de energia ao longo dos meses do ano.

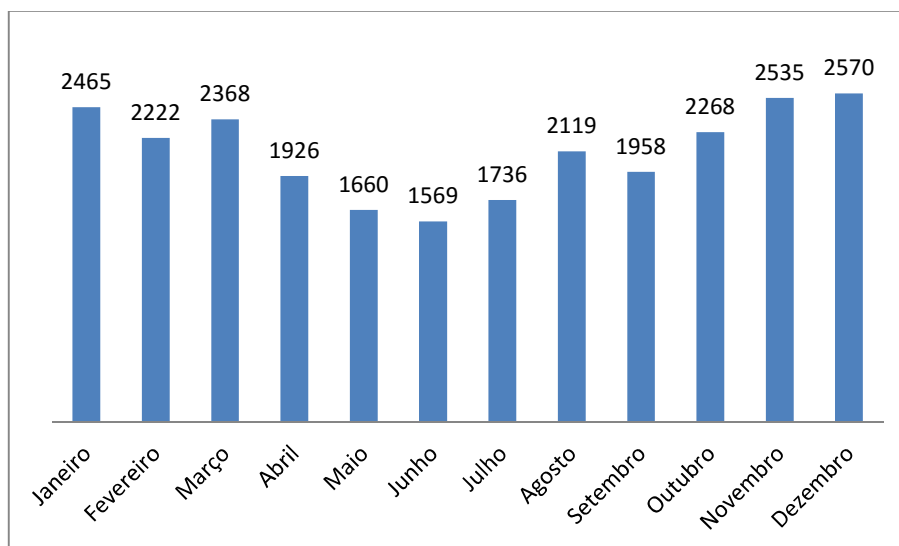


Figura 19 – Geração mensal estimada de energia elétrica (kWh/mês)

Fonte: O autor (2016).

O valor médio mensal ao longo do ano, de energia gerada estimada, é de 2116 kWh/mês, superando os 2.073kWh/mês que foi estimado inicialmente, pois o número de módulos foi aproximado para um número acima do que o calculado, já que se tratava de um número não inteiro de 73,44 módulos. Com o arredondamento de módulos para 74, a geração estimada sobrepõe o valor inicialmente proposto em 14 kWh/mês.

4 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pessoas estão buscando formas alternativas de gerar energia, com o propósito de reduzir o custo da conta de energia elétrica. A geração de energia utilizando sistemas fotovoltaicos é uma forma alternativa que vem ganhando espaço e chamando a atenção de pessoas ao redor do mundo. É uma fonte de energia limpa e renovável com baixa manutenção e totalmente modulável.

O correto dimensionamento do sistema fotovoltaico traz benefícios referentes à redução de custo total do sistema, pois minimiza a quantidade de material necessário e também estima a geração de energia.

O local da pesquisa possui uma vasta área de telhado, contando com 3.000 metros quadrados disponíveis para a aplicação, constituído por 4 abas distintas, sendo a melhor aba foi elegida por contar com a melhor orientação para o norte, além da inclinação favorável e o menor desvio azimutal. Esta aba possui 675 metros quadrados, sendo 15 de largura e 45 de comprimento. Desses 675 metros quadrados, menos de 25% foi utilizado, 155 metros quadrados foram previstos para ser utilizados já admitindo certa folga para facilitar eventuais manutenções ou reparos no sistema. Por se tratar de um sistema altamente modulável, é factível a expansão desse sistema e atingir facilmente uma potência quatro vezes maior que a presumida, caso necessário futuramente.

Neste projeto a potência total do sistema foi levemente maior que o esperado, de 19.095 W, para 19.240 W. Essa circunstância foi ocasionada por conta da quantidade de módulos fotovoltaicos acima do essencial, que era de 73,44 módulos para 74 módulos.

Por conta da potência do sistema acima do essencial, a estimativa de geração mensal excede as expectativas de demanda real 2.073kWh/mês, a estimativa de produção é de 2.116kWh/mês, superando 43kWh/mês. Esse incremento de energia representa um pouco mais de 2%, assim pressupõe-se que o sistema fotovoltaico está bem dimensionado.

Caso a demanda de energia do estabelecimento cresça a expansão do sistema pode alcançar até 76.960 W de potência com geração de energia elétrica mensal estimada de 8.348 kWh/mês, levando em conta somente uma das quatro abas disponíveis.

A tecnologia fotovoltaica demonstra-se muito eficaz em atender demandas junto ao ponto de consumo, sendo uma boa escolha para quem busca um meio de gerar energia individualmente.

Os diversos potenciais desta tecnologia, como a baixa manutenção, modularidade e robustez, leva a crer que este sistema crescerá cada vez mais, ainda mais por ser um sistema de geração de energia renovável e limpa.

Quanto ao dimensionamento dos condutores, verifica-se que uma maior distância é arbitrada para o lado CC do que para o lado CA. Isso acontece, pois, a área de intersecção do fio é inversamente proporcional a tensão, então, procura-se aumentar a distância do lado que tem a maior tensão, neste caso, o lado CC, para conseguir obter um menor diâmetro do fio.

A escolha do tipo de módulo, de silício policristalino, está relacionada a facilidade de encontrar esses módulos no mercado, o custo e até o tipo de inversor elegido. Atualmente a maioria dos revendedores de módulos dispõe somente de módulos de silício cristalino e a busca por uma tecnologia diferente pode até levar a uma frustração. A escolha do módulo foi feita relacionando o preço pela potência, com o propósito de obter o menor custo por Wp e o custo referente a esse módulo é de R\$3,31/Wp. Por ter um inversor sem transformador não abre as possibilidades do uso de módulos de silício amorfo, pois, módulos de silício amorfo impõem o uso de inversores com isolamento galvânica, ou seja, inversores com transformador.

O inversor definido neste projeto dispõe de diversas características que beneficiam o sistema fotovoltaico, como, não ter um transformador, que faz ter uma eficiência maior do que um inversor com transformador, que tem mais perdas na transformação da energia. A tecnologia de MPPT também ajuda na maior performance do sistema como um todo. Por contar com 2 MPPT é possível realizar uma melhor distribuição do conjunto de módulos, formando uma rede mista com módulos em paralelo e em série, com corrente e tensão que satisfazem tanto a faixa de tensão em que o MPPT atua, quanto a tensão máxima suportada pela associação de módulos em série. A escolha de um só inversor pode não ser a melhor escolha, pois por conta de uma falha no inversor o sistema inteiro para de funcionar, mas a intenção neste projeto foi demonstrar a complexidade de associações distintas de módulos, que nesse caso, foram 18 módulos em série,

paralelo com outros 18 módulos em série, e outra associações de 19 módulos em série, paralelo com outros 19 módulos em série.

O sistema em estudo supre 100% da energia necessária. A taxa de 100 kWh/mês mínima da concessionária não foi levada em consideração, por representar menos de 5% da energia necessária a ser gerada por mês. Os meses com menor radiação solar são compensados por meses de maior radiação solar, pois a energia produzida a mais é acumulada e utilizada como crédito nos próximos meses.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Balanco das águas**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/BalancodasAguas/Balanco_das_aguas_2014-2015.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota técnica nº 43/2010-SRD/ANEEL**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0043_GD_SRD.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 04dez. 2016.

AMARAL, Gustavo. **Crises hídricas e seus impactos**. Disponível em: <<http://www.pucsp.br/sites/default/files/download/posgraduacao/programas/administracao/bisus/bisus-1s-2015-vol1.pdf>> Acesso em: 24 ago. 2016.

AMÉRICA DO SOL. **Potencial Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/potencial-brasileiro>>. Acesso em: 22 jul. 2015.

ARCHIEXPO. Disponível em: <http://www.archiexpo.com/prod/era-solar-colt/product-69868-716916.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA>; acesso em setembro de 2016.

CANADIAN SOLAR. Disponível em: <http://www.canadiansolar.com/solar-panels/standard.html>; acesso em setembro de 2016.

CARTA CAPITAL. **Há risco de racionamento de água e energia?**. Disponível em: <<http://www.cartacapital.com.br/revista/843/gotas-de-menos-1799.html>>. Acesso em: 22 jul. 2015.

CEPEL. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESEB, 2014.

CEPEL. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESEB, 1999.

CLEMENTE, Ademir; SOUZA, Alceu. **Decisões financeiras e análise de investimentos**: fundamentos técnicos e aplicações. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

COPEL. **Entenda as bandeiras tarifárias que começam em janeiro**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Frural%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FC2F891926071E8F203257DC50046A10B>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

CRAIDE, Sabrina. Aneel aprova aumento de até 39,5% para contas de luz de 58 distribuidoras. **AGENCIA BRASIL**, Brasília, FEV. 2015. Disponível em:

<<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-02/aneel-aprova-aumento-de-ate-39-para-contas-de-luz-de-58-distribuidoras>>. Acesso em: 12 jul. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2015**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 24ago. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota técnica DEA 19/14**. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20\(Revisada\).pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20(Revisada).pdf)>. Acesso em: 22 jul. 2015.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION .**Global Market Outlook for Photovoltaics 2014 – 2018**. Disponível em: <http://www.cleanenergybusinesscouncil.com/site/resources/files/reports/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_-_Medium_Res.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION .**Global Market Outlook for Photovoltaics 2015 – 2019**. Disponível em: <http://helapco.gr/pdf/Global_Market_Outlook_2015_-2019_Ir_v23.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2016.

FONSECA, José. **Elaboração e análise de projetos**: A viabilidade econômico-financeira. 1 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2012.

FRONIUS. Disponível em: <http://www.fronius.com/internet/img/SE/SE_WPIC_Fronius_Symo_20_kW_web_rda_x_100.jpg>; acesso em setembro de 2016.

GAZOLI, Jonas; VILLALVA, Marcelo; GUERRA, Juarez. **Energia solar fotovoltaica**: sistemas conectados à rede elétrica. 82. ed. São Paulo: Atitude editorial , 2012.

GRÄTZEL, Michael; O'REGAN, Brian. **A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dyesensitized Colloidal TiO₂ Films**, Nature, Vol. 353, pps 737-740, 1991.

GREEN, Martin. **Clean Energy from Photovoltaics**. Editora World Publishing, 2001.

HERZOG, Antonia; LIPMAN, Timothy; KAMMEN, Daniel. **Renewable energy sources**. Renewable and Appropriate Energy Laboratory (RAEL), 2001.

IRENA. **Renewable energy technologies**: Cost analysis series. 1 ed. Disponível em: <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2016. Junho, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha energética brasileira**: exercício de 2015. Brasília. 2016. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+->

+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;jsessionid=B415252F7145EC1BD6596B2C8137D1B8.srv155?version=1.0>; acesso em outubro de 2016.

NEOSOLAR. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/260wp-canadian-csi-cs6p.html>> E <<http://www.neosolar.com.br/loja/inversor-fronius-symo-20-0-3-m-light-20000w.html>>; acesso em setembro de 2016.

PEREIRA, Enio; MARTINS, Fernando; ABREU, Samuel; RÜTHER, Ricardo; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

REN21. **Global status Report**. Paris, 2016. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf>; acesso em setembro de 2016.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligadas à rede elétrica pública no Brasil. 1. ed. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SCHOTT Solar. **Crystalline Silicion Technology**. Disponível em: <http://www.us.schott.com/photovoltaic/english/about_pv/technologies/crystalline/>. Acesso em: 22 mar. 2016.

SILVA, Sandra Sereide Ferreira; ALVES, Alan Carlos; RAMALHO, Angela Maria Cavalcanti; LACERDA, Cicero de Sousa; SOUSA, Cidoval Moraes. **Complementaridade hidro eólica: desafios e perspectiva para o planejamento energético nacional**. Paraíba, 2015.

SOUZA, Ronilson. **Introdução a sistemas solares**. Brasil. 1 ed. Ribeirão preto: Bluesol, 2014.

URBANETZ, Jair. **Energia solar fotovoltaica**. II Curso de especialização em energias renováveis. Curitiba, p.4 , 2015.

URBANETZ, Jair. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas**: sua influencia na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. Florianópolis, 2010.