



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

JEFFERSON DE OLIVEIRA MENEZES

**PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL HORIZONTAL DA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB**

**CAMPINA GRANDE – PB
2017**

JEFFERSON DE OLIVEIRA MENEZES

**PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL HORIZONTAL DA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como exigência para obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima

**CAMPINA GRANDE – PB
2017**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

M543p Menezes, Jefferson de Oliveira.
Projeto de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica para um condomínio residencial horizontal da cidade de Campina Grande - PB [manuscrito] : / Jefferson de Oliveira Menezes. - 2017.
71 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Energia renovável. 2. Energia solar. 3. Radiação solar.

21. ed. CDD 333.792 3

JEFFERSON DE OLIVEIRA MENEZES

**PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL HORIZONTAL DA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como exigência para obtenção do título de Engenheiro Sanitário e Ambiental.

Aprovada em: 12/12/2017

Nota: 4,2 (42,2%)


Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima/UEPB
Orientador


Prof. Dr. Fernando Fernandes Verra/UEPB
Examinador


Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros/UFGG
Examinadora

CAMPINA GRANDE
2017

À minha mãe e meu pai que nunca mediram esforços para garantir minha educação e saúde.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada e que me deu forças para superar todas as dificuldades.

À minha família, em especial aos meus pais Jessé e Avani, pelo amor infinito e incondicional, agradeço pelo apoio, incentivo, cuidado e dedicação para que eu pudesse conquistar e seguir em busca dos meus objetivos. Sem eles nada seria possível.

À minha Avó Anita Martins, por ser uma segunda mãe, e sempre foi cuidadosa e uma companheira alegre.

À minha namorada Brennda Almeida, por acreditar em mim, ser minha companheira e estar sempre presente na minha vida, me incentivando e apoiando minhas decisões.

Aos meus colegas de curso que compartilharam todas as tristezas, alegrias, derrotas e conquistas.

Ao meu orientador professor Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, que me apresentou o mundo da energia fotovoltaica, com suas ideias, orientações e engajamento no desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo e sócio David Oliveira, por toda ajuda e contribuição na elaboração desse trabalho.

Por fim, todos os funcionários da UEPB, em especial aos que foram meus professores e contribuíram para minha formação de Engenheiro.

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BMU – *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CRESEB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos
HSP – Horas de Sol Pico
ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
KWh – Kilowatt-hora
KWp – Kilowatt-pico
MME – Ministério de Minas e Energia
MPPT – *Maximum Power Point Tracking*
SFCR – Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SWERA – Solar and Wind Energy Resources Assessment
TIR – Taxa Interna de Retorno
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
VPL – Valor Presente Líquido
Wh – Watt-hora

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do espectro da radiação solar	19
Figura 2 - Cristal de Silício	21
Figura 3 – Diagrama de uma célula solar	22
Figura 4 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica	23
Figura 5 – Lingote de silício monocristalino	24
Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino	24
Figura 7 - Lingote de silício policristalino	25
Figura 8 - Célula fotovoltaica de silício policristalino	25
Figura 9 - Módulos fotovoltaicos de filmes finos de silício	26
Figura 10 - Mapa de irradiação solar do Brasil	27
Figura 11 - Mapa de irradiação solar da Alemanha	28
Figura 12 - Homologações de sistemas fotovoltaicos por região	30
Figura 13 - Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalino	31
Figura 14 - Orientação do painel fotovoltaico	32
Figura 15 - Bateria Estacionária	33
Figura 16 - Bateria Chumbo-ácido	34
Figura 17 - Controlador de Carga	36
Figura 18 - Inversor Interativo	37
Figura 19 - String Box	38
Figura 20 - Diagrama simplificado do sistema fotovoltaico autônomo	39
Figura 21 - Funcionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede	40
Figura 22 – Condomínio Residencial Horizontal	41
Figura 23 - Mapa da Radiação Solar Global Horizontal	43
Figura 24 - Dados de irradiação solar obtidos com a ferramenta SWERA	44
Figura 25 - Telhado da portaria	45
Figura 26 - Vista de cima do telhado da portaria	45
Figura 27 - Telhado da academia e salão de festas	46
Figura 28a - Telhado Sul com inclinação de 10°	47
Figura 28b - Telhado sul com inclinação de 10°	47
Figura 29 - Telhado Norte com inclinação de 15° (DRONE)	47
Figura 30 - Tipos de estrutura fixação para painéis solares	52

Figura 31 - Características de temperatura dos módulos fotovoltaicos	53
Figura 32 - Estimativa de geração de energia elétrica total	57
Figura 33 – Simulação do Arranjo fotovoltaico para o sistema A inversor ABB PRO 33.0	59
Figura 34 – Simulação do Arranjo fotovoltaico para o sistema A inversor ABB PRO 27,6	59
Figura 35 - Faixa ótima para entrada de tensão, corrente e potência no inversor ABB 33 KW.	60
Figura 36 - Limites de entrada de tensão, corrente e potência no inversor ABB 27,6 kW	60
Figura 37 - Inversor ABB PRO 33.0-TL-OUTD-SX-400 – TRIFÁSICO 380 V	61
Figura 38 - Inversor ABB TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X-400 - Trifásico 380V	61
Figura 39 – Simulação do Arranjo fotovoltaico para o sistema B inversor ABB PRO 27,6	62
Figura 40 - Limites de entrada de tensão, corrente e potência no inversor ABB 27,6 kW	62
Figura 41 – Diagrama unifilar para o sistema A	63
Figura 42 – Diagrama unifilar para o sistema B	63
Figura 43 – Retorno financeiro do investimento	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo mensal de energia elétrica	42
Tabela 2 - Valores mensais de Irradiação Solar obtidos no SWERA	44
Tabela 3 - Áreas disponíveis e suas características	47
Tabela 4 - Custo de disponibilidade	47
Tabela 5 - Fatores de correção para superfície inclinada	50
Tabela 6 - Multiplicação dos valores de radiação solar por fatores de correção no plano inclinado	50
Tabela 7 - Temperatura por tipo de fixação	52
Tabela 8 - Valores calculados no projeto	54
Tabela 9 - Estimativa de geração de energia elétrica para o sistema A de 79,2 KWp	56
Tabela 10 - Valores calculados no projeto	56
Tabela 11 - Estimativa de geração de energia elétrica para o sistema B de 31,35 KWp	57
Tabela 12 - Custos para implantação do sistema	64
Tabela 13 - Premissas e Taxas	65
Tabela 14 - Resultados econômicos	66

RESUMO

Atualmente a energia elétrica se tornou essencial para a execução de basicamente todas as tarefas realizadas. A matriz energética cresceu exponencial e os avanços tecnológicos acompanharam e por consequência agravaram os impactos ambientais. Por isso, nos dias de hoje investe-se muito em geração de energia elétrica de fonte renováveis, ou seja, que agridam menos o meio ambiente. Uma forma de transformação de energia renovável que está crescendo é a energia solar fotovoltaica, onde se utiliza uma fonte de energia inesgotável. Essa energia renovável, que utiliza a radiação do sol como fonte energética, encontra um potencial muito grande no Brasil, não só pelas condições climáticas, mas também pelo alto custo da tarifa energética. As casas, empresas, condomínios também devem se adaptar à essa nova realidade. Com isso, este trabalho utiliza-se de um condomínio residencial horizontal para projetar e avaliar o custo de implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede, com intuito de trazer economia aos condôminos, levando em consideração alguns dados como: irradiação local, disponibilidade de área e consumo energético. Por fim, é realizado um estudo financeiro, para calcular o tempo de retorno do valor investido, considerando o rendimento do sistema de geração de energia fotovoltaica e a inflação energética. Verificou-se que seria necessário um investimento de R\$ 425.055,60 para um sistema de 110,22 kWp e partir do quarto ano de funcionamento do sistema, o investimento será pago.

Palavras-chave: Energia Renovável, Radiação Solar, Análise Técnico-Economica, Sistema on-grid

ABSTRACT

Currently the electric power has become essential for the execution of basically all tasks performed. The energy matrix has grown exponentially and technological advances have accompanied and consequently aggravated environmental impacts. That is why, nowadays, a lot of energy is invested in the generation of renewable energy sources, that is, they are less harmful to the environment. One form of renewable energy transformation that is growing is photovoltaic solar energy, where an inexhaustible source of energy is used. This renewable energy, which uses solar radiation as an energy source, has a very great potential in Brazil, not only because of the climatic conditions, but also because of the high cost of energy tariffs. Homes, businesses, condominiums must also adapt to this new reality. This work uses a horizontal residential condominium to design and evaluate the cost of implementing a photovoltaic system connected to the grid, in order to bring savings to the condominium owners, taking into account some data such as: local irradiance, availability of area and energy consumption. Finally, a financial study is carried out to calculate the return time of the invested value, considering the yield of the photovoltaic energy generation system and the energy inflation. It was verified that it would require an investment of R \$ 425,055.60 for a system of 110.22 kWp and from the fourth year of operation of the system, the investment will be paid.

Keywords: Renewable Energy, Solar Radiation, Technical-Economic Analysis, On-grid system

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Energias Renováveis	17
2.2 Energia Solar	18
2.3 Radiação Solar	18
2.4 Irradiância	20
2.5 Energia Solar Fotovoltaica	20
2.5.1 Efeito Fotovoltaico	21
2.5.2 As células fotovoltaicas	23
2.5.2.1 Silício Monocristalino	23
2.5.2.2 Silício Policristalino	25
2.5.2.3 Filmes Finos	26
2.6 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	26
2.6.1 Legislação brasileira	29
3 SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	31
3.1 Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos	31
3.1.1 Módulo Fotovoltaico	31
3.1.1.1 Orientação do painel fotovoltaico	32
3.1.2 Baterias	33
3.1.2.1 Baterias de Chumbo-ácido Estacionária	34
3.1.2.2 Baterias de Níquel-Cádmio	35
3.1.3 Controladores de Cargas	35
3.1.4 Inversores	36
3.1.5 Outros Componentes	37
3.2 Configurações de um sistema fotovoltaico	38
3.2.1 Sistemas Isolados	38
3.2.2 Sistemas Conectados à Rede	39
4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	41
4.1 Dados de consumo energético	42
4.2 Incidência solar em Campina Grande	42

4.3 Estudo de área disponível	44
4.4 Estimativa de geração do sistema A	55
4.5 Estimativa de geração do sistema B	57
5 SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR INTERATIVO	58
6 CUSTO DO SISTEMA E TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO	64
7 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNCIDE A - Tabela do tempo de retorno de investimento	72

1 INTRODUÇÃO

O Sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. A Terra recebe diariamente uma quantidade de energia solar, em forma de luz e calor, suficiente para suprir as necessidades mundiais durante milhares de anos. Apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada. Mesmo assim, com poucas exceções, praticamente toda a energia usada pelo ser humano tem origem no sol (VILLALVA, 2015).

É a energia do sol que modifica o estado físico da água, fazendo com que evapore, precipite e possa ser represada e utilizada nas usinas hidrelétricas. O calor do sol aquece as massas de ar que provocam os ventos, onde são aproveitadas em geradores instalados em torres eólicas, então a diferença de temperatura e pressão faz com que os ventos adquiram energia cinética e possa ser utilizada como fonte energética. As plantas necessitam da luz do sol para realizar a fotossíntese e são as plantas as fontes de energia de biomassa. O petróleo, gás natural e o carvão também são provenientes do sol, pois é consequência da decomposição da matéria orgânica, como por exemplo, restos de vegetação e animais pré-históricos, produzida há milhares de anos (LAMARCA JUNIOR, 2012).

As fontes renováveis de energia são definidas como inesgotáveis. Podemos utilizá-las constantemente e nunca se acabam. Temos como exemplo a energia solar, que aproveita diretamente para aquecimento e geração de eletricidade, eólica, geotérmica, biomassa, hidrelétrica.

O uso de energia está atrelado com o desenvolvimento do ser humano, consequentemente a transformação do meio ambiente, então com a elevada demanda e consumo de energia, os combustíveis fósseis se tornaram a fonte principal de energia, principalmente o petróleo.

O uso constante de fontes de energia de origem fóssil provoca inúmeros impactos ao meio ambiente. De acordo com um estudo realizado pelo Ministério do Meio Ambiente Alemão (BMU) diz que, do total de 1 trilhão de toneladas de CO₂ emitidos no planeta, 80% corresponde às emissões dos últimos 50 anos. Esse fato está relacionado diretamente com o aumento da temperatura média do planeta, uma vez que é sabido do potencial de dióxido de carbono para o efeito estufa (BMU, 2008).

No campo econômico-político, a alta dos preços da eletricidade produzida por combustíveis fósseis, tem como causa as incertezas devido à disponibilidade de reservas e instabilidade política em alguns países exportadores. Mesmo os países que produzem boa parte de sua eletricidade a partir de fontes renováveis, como exemplo o Brasil, cuja principal matriz energética são as hidrelétricas, existe uma variação no preço da energia, o qual oscila de acordo com o nível dos reservatórios das barragens (BENEDITO, 2009).

Diante deste cenário, há um aumento na preocupação com o meio ambiente e uma crescente demanda no uso de energia, então tornou-se como objetivo gerar energia de forma sustentável, sem causar impacto ao meio ambiente e garantindo a integridade da população.

É nesse contexto que se insere a luz do sol, como dito anteriormente, é a fonte primária de energia, sendo a responsável por todas as outras fontes energéticas. O desenvolvimento sustentável é assunto que ganhou espaço em todos os setores, tanto na indústria quanto na sociedade e a geração elétrica através do sol, é capaz de suprir com inúmeras vantagens as formas tradicionais de geração, além de ser uma alternativa que causa o mínimo de impacto ambiental e de grande potencial. E o Brasil é um país que tem potencial para o aproveitamento de energia solar fotovoltaica durante todo o ano.

A conversão fotovoltaica da energia solar, também chamados de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), é uma opção a ser implantada como fonte de geração de energia. Em termos ambientais e técnicos, esse sistema apresenta muitas vantagens comparada com outras fontes. A energia gerada pode ser utilizada na edificação que foi instalada e, caso de excedentes, estes não necessitam ser armazenados em baterias, pois podem ser injetados na rede elétrica da concessionária (ANEEL 482, 2012).

O objetivo deste trabalho é projetar um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica interligado a rede elétrica de distribuição da concessionária e avaliar sua viabilidade técnico-econômica, para um condomínio residencial horizontal de Campina Grande – PB. Para atingir o objetivo geral, é necessário estipular objetivos específicos:

- Dimensionar o sistema de acordo com a legislação vigente da ANEEL;
- Desenvolver estudo preliminar envolvendo o consumo, área para instalação dos painéis e de todo o sistema;

- Quantificar a energia mensal produzida pelo sistema projetado;
- Analisar o retorno financeiro do investimento;

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Energias Renováveis

Constantemente as energias limpas são comparadas as energias derivadas dos combustíveis fósseis, pois apresentam um menor impacto ambiental e praticamente não produzem poluentes para atmosfera. Porém, a exploração de qualquer tipo de energia, seja ela renovável ou não renovável causará danos ao meio ambiente, cabe ao homem buscar por fontes alternativas que promova uso sustentável.

As torres eólicas provocam as mortes de pássaros, alteram as paisagens e não são silenciosas. Na confecção das células solares é utilizado o silício, componente de extração mineral que causa impacto ao meio, além disso é utilizado componentes tóxicos. Apesar desses impactos negativos, as fontes renováveis são limpas comparadas com as não renováveis. Uso de fontes renováveis reduz a emissão de poluentes e ameniza o efeito estufa (VILLALVA, 2015).

Até o século passado, a fonte de energia elétrica mais utilizada pelo homem, era através dos combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e o carvão e também a energia nuclear. Porém estas formas de obtenção de energia, são limitadas, poluem o meio ambiente e são perigosas, caso da energia nuclear, que em caso de acidente, pode gerar consequências graves para a sociedade. Atualmente, são consideradas renováveis as energias que derivam do sol, vento, da água e a biomassa (GALDINO et al., 2005).

Tema de grande importância e discussão, as energias renováveis tornam a produção de energia um setor estratégico para o mundo todo. Hoje se tem a preocupação em reduzir custos, aumentar a oferta e ser sustentável. E é nessas características que as energias renováveis vêm ganhando destaque, tendo apoio das principais organizações mundiais para sua exploração.

Entre estas, a energia solar vem se destacando por inúmeras vantagens, são elas: não causa ruídos, não emite poluentes, são viáveis financeiramente por apresentar elevada vida útil e baixa manutenção, e o sol, que é sua fonte, pode ser considerada infinita.

2.2 Energia Solar

A energia solar provém da luz e do calor do Sol. Segundo o estudo do Plano Nacional de Energia 2030, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a irradiação solar incidente por ano na superfície da Terra é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia do mundo. Essa radiação, porém, não atinge de maneira uniforme toda a crosta terrestre, depende da latitude, da estação do ano e de condições atmosféricas como nebulosidade e umidade relativa do ar. Ao passar pela atmosfera terrestre, a energia solar manifesta-se sob a forma de luz visível de raios infravermelhos e de raios ultravioleta. É possível captar essa luz e transformá-la em alguma forma de energia utilizada pelo homem: térmica ou elétrica. São os equipamentos utilizados nessa captação que determinam qual será o tipo de energia a ser obtida.

Quando se utiliza uma superfície escura para captação, a energia solar é convertida em calor, muito utilizada para aquecimento de água. Caso seja utilizado células fotovoltaicas, a consequência é eletricidade. Os equipamentos utilizados para converter em calor, são chamados de coletores solares, ou concentradores solares, quando é necessário concentrar a radiação em um só ponto. Na geração de energia elétrica, são as placas fotovoltaicas, que fazem o trabalho de gerar eletricidade.

No sistema fotovoltaico, a transformação em eletricidade é direta. É utilizado um material semicondutor para que ao momento que é captado a radiação solar, ocorra um fluxo de elétrons, produzindo energia (EPE, 2007).

Importante destacar que mesmo em períodos chuvosos ou nublados, há produção de energia elétrica, isso porque o sistema fotovoltaico não necessita diretamente do brilho Sol.

2.3 Radiação Solar

A radiação solar é formada por ondas eletromagnéticas de frequência e comprimentos diferentes, que chegam ao nosso planeta através do espaço. Sabe-se que frequência e comprimento de onda são grandezas inversamente proporcionais, entretanto energia e frequência se relacionam de forma direta. Portanto quanto maior a frequência, maior a energia transmitida e menor será o comprimento da onda (VILLALVA, 2015).

Nesse contexto, a Equação 1 de Plank-Einstein estabelece a relação entre frequência e energia, através da expressão:

$$E = h \cdot f \quad [1]$$

Em que E é a energia da onda expressa em Joules (J), f a frequência expressa em hertz (Hz), e h , constante física de Planck, cujo valor é $6,636 \cdot 10^{-34}$ [J.s].

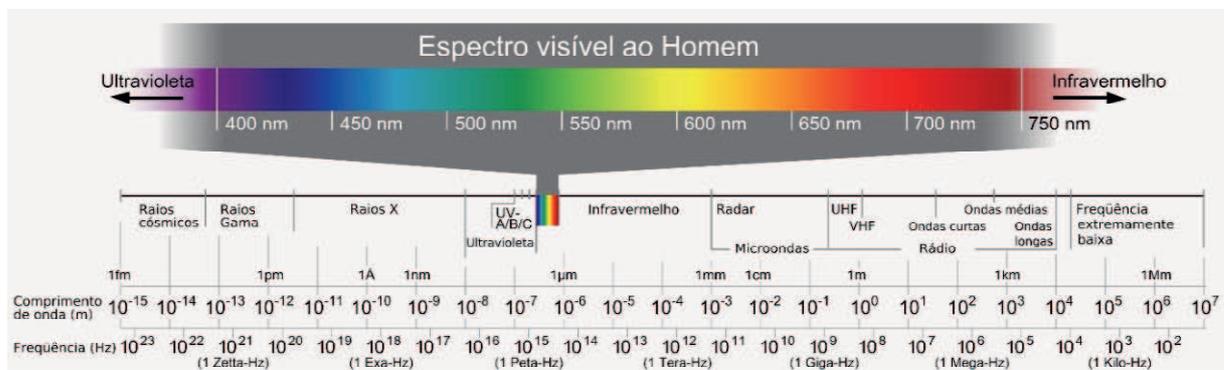
Sabe-se que a luz é uma onda eletromagnética que viaja no vácuo do espaço a uma velocidade constante de $300.000 \text{ km.s}^{-1}$, aproximadamente, e relaciona-se com a frequência e o comprimento de onda através da relação matemática, apresentada na Equação 2:

$$c = \lambda \cdot f \quad [2]$$

Em que c é a velocidade da luz, λ é o comprimento da onda, expressa em submúltiplos de metros, e f é a frequência da onda em hertz.

Apenas uma parte das ondas vindas do Sol pode ser captada pelo olho humano, mas a outra parte pode ser detectada de outras formas cujo o conjunto é nomeado de espectro de radiação solar. Todo o espectro de radiação, seja a visível ao olho humano e as não visíveis, transporta energia que pode ser captada na forma de calor ou luz (VILLALVA, 2015). A Figura 1 ilustra a composição do espectro da radiação solar.

Figura 1 – Composição do espectro da radiação solar



Fonte: METEOROPOLE, 2015

A energia eletromagnética é transformada em energia térmica através da captação do calor, isso ocorre quando as ondas eletromagnéticas incidem em uma superfície capaz de absorver a radiação, a energia eletromagnética é transformada em energia cinética que, por sua vez, transmite calor aos átomos e moléculas do material. Desse modo, a temperatura está relacionada com o grau de agitação das moléculas, ou seja, quanto maior a agitação das moléculas, maior será a temperatura de um corpo. De outra maneira, quando as ondas eletromagnéticas incidem em outro tipo de material, podem provocar alterações nas propriedades elétricas ou originar tensões e correntes elétricas (VILLALVA, 2015).

A radiação eletromagnética do Sol produz o efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, através da criação de uma diferença de potencial, sobre uma célula composta por materiais semicondutores (ZILLES et al., 2012).

2.4 Irradiância

Irradiância ou irradiação é uma grandeza empregada para determinar a potência de radiação solar em uma determinada área expressa em $W.m^{-2}$. Define-se potência como uma grandeza que transporta energia durante um determinado intervalo de tempo, por isso quanto maior a potência de radiação solar, maior será a quantidade de energia transportada durante intervalo de tempo (VILLALVA, 2015).

Sabe-se que no espaço extraterrestre, na distância média entre Sol e a Terra, a irradiância é aproximadamente de $1353 W.m^{-2}$. A irradiância é medida através de sensores de radiação solar, na Terra registra-se cerca de $1000W.m^{-2}$, que é o valor adotado como padrão no mercado fotovoltaico. A medida de irradiância é extremamente importante para avaliar a eficiência do sistema fotovoltaico, servindo, ainda, de parâmetro de teste das células e módulos fotovoltaicos. Através de um sensor de armazenamento os valores obtidos durante um dia, permite calcular a quantidade de energia recebida numa determinada área. Da mesma forma nos permite calcular a energia solar recebida ao longo de uma semana, mês e ano (GALDINO et al., 2005).

2.5 Energia Solar Fotovoltaica

A Energia fotovoltaica é obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade por meio de placas fotovoltaicas feitas por materiais semicondutores, esse processo é conhecido como efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico foi primeiramente observado pelo físico Francês Edmond Becquerel em 1839, uma tensão elétrica resultante da ação da luz sobre um eletrodo metálico imerso em solução química. Em 1877, Adams e Day, cientistas ingleses, observaram o mesmo efeito, porém no selênio sólido, outro material semicondutor. Com passar do tempo várias outras experiências foram realizadas por cientistas em todo o mundo, até que em 1905, Albert Einstein, cientista nascido na Alemanha, explicou o efeito fotoelétrico, que tem relação com o efeito fotovoltaico, pesquisa que lhe concedeu o prêmio Nobel (ZILLES et al., 2012).

O silício (Figura 2) é o material semicondutor mais utilizado para a fabricação de células fotovoltaicas. Mesmo existindo diversos tipos de materiais, as células de silício são a com maior disseminação no mercado por causa de sua tecnologia está bem desenvolvida, além de que sua matéria-prima é abundante e barata. (GHENSEV, 2006)

Figura 2: Cristal de Silício



Fonte: PORTAL SOLAR, 2016

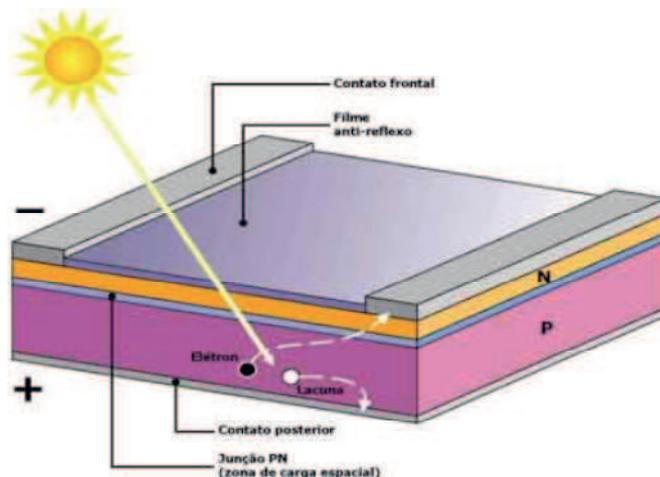
O silício tem vantagens sobre outros materiais semicondutores por ser um material não tóxico e disposto em abundância no nosso planeta. Mesmo outros materiais possam fornecer uma eficiência maior na conversão de energia, o processo de fabricação das células de silício tem um custo menor e é mais simples comparado com outros, portanto se torna mais viável explorar o silício.

2.5.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores que tem a capacidade de absorver os fótons presentes na radiação solar. A energia absorvida quebra as ligações químicas das moléculas presentes na estrutura do material semicondutor. Portanto, cargas elétricas são liberadas podendo realizar trabalho (ZILLES et al, 2012).

A célula fotovoltaica é composta por uma lâmina de silício purificado dopada, ao mesmo tempo, com boro e fósforo. A parte dopada com fósforo, do tipo-N, fica exposta ao sol, onde são colocados contatos frontais e traseiros, sendo que os contatos frontais sobre a parte tipo-N causam sombra e reflexão, diminuindo a eficiência da célula, a parte dopada com boro, do tipo-P, fica na parte inferior da célula e é maior que o tipo-N. O material N apresenta excedente de elétrons e o material P falta de elétrons, devido essa diferença de elétrons nas camadas, os elétrons do tipo-N fluem para a camada tipo-P gerando um campo elétrico interno que se torna responsável pela consolidação da conversão fotovoltaica. A Figura 3 ilustra as camadas que compõe as células fotovoltaicas (SOUZA, 2017).

Figura 3 – Diagrama de uma célula solar

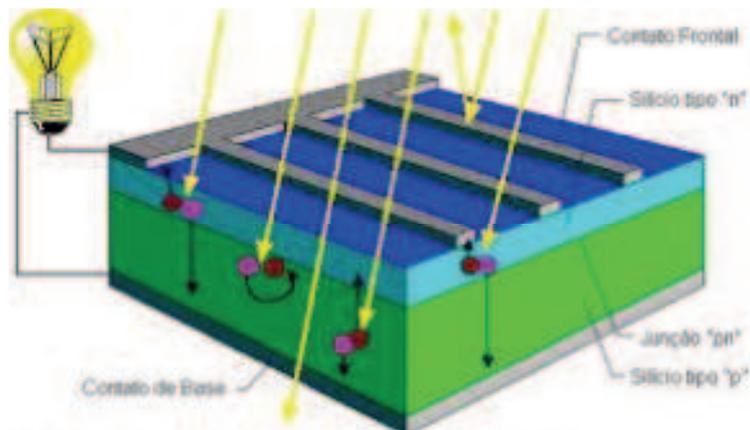


Fonte: NÚCLEO DE TECNOLOGIA EM ENERGIA SOLAR, 2017

Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada P para a camada N. Por meio de um condutor externo que liga a camada negativa à positiva, gera-se fluxo de elétrons (corrente elétrica) e enquanto a luz incidir na célula, o fluxo será mantido. A intensidade da corrente elétrica gerada

variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. (ZILLES et al., 2012). A Figura 4 apresenta no corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Figura 4 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Fonte: PORTAL SOLAR, 2017

2.5.2. As células fotovoltaicas

Atualmente existem várias tecnologias na fabricação de células fotovoltaicas, as mais comuns são as de silício monocristalino, a do silício policristalino e a do filme fino de silício. O silício empregado nas células é derivado do mineral quartzo, o qual um dos principais países produtor desse minério é o Brasil, porém a purificação do silício e a fabricação das células são feitas no exterior.

2.5.2.1. Silício Monocristalino

O silício monocristalino são aquecidos em altas temperaturas e submetidos ao método de Czochralski, que consiste na formação de cristal, o resultado desse processo é o lingote de silício monocristalino mostrado na Figura 5.

O lingote de silício monocristalino é constituído por uma estrutura cristalina única, seu aspecto brilhoso e uniforme é devido a sua estrutura molecular homogênea. Posteriormente, o processo na fabricação do silício monocristalino é a formação de *wafers* de silício, que são finas bolachas de silício puro após o lingote ser serrado e

fatiado. Os *wafers* são submetidos a processos químicos que recebem impurezas nas suas faces, formando as camadas P e N, que basicamente constituem a célula fotovoltaica (VILLALVA, 2015).

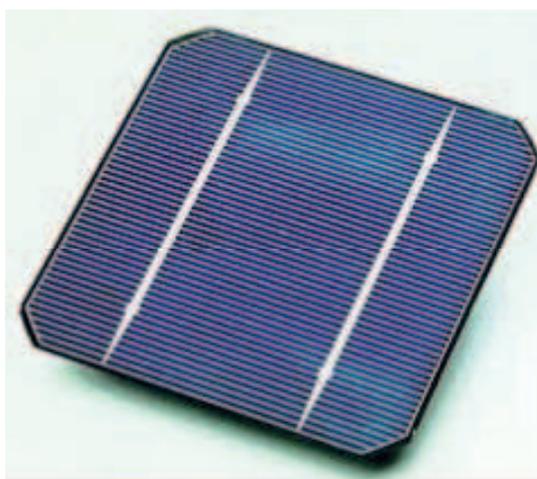
Figura 5 – Lingote de silício monocristalino



Fonte: PORTAL SOLAR, 2017

Por fim, a célula semiacabada recebe em uma das suas faces uma grade metálica, uma película metálica na outra face e uma camada de material antireflexivo na face em que vai ficar voltada para a luz. O produto final é a célula fotovoltaica monocristalina (Figura 6) (VILLALVA, 2015).

Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino



Fonte: ECOVOLTS, 2017

As células monocristalinas são as mais eficientes e as mais produzidas. Sua eficiência chega a 18%, porém seu custo de produção é o mais caro. São células

quebradiças que necessitam ser montadas em módulos para adquirirem resistência para o uso.

2.5.2.2. Silício Policristalino

O processo de fabricação do silício policristalino é mais barato que o monocristalino. O lingote de silício (Figura 7) é composto por aglomerado de pequenos cristais e com tamanho e orientações diferentes, contendo um aspecto áspero.

Figura 7 - Lingote de silício policristalino



Fonte: VILLALVA, 2015

Também será serrado para produzir *wafers*, que posteriormente será transformado em células fotovoltaicas. Geralmente as células policristalinas (Figura 8) apresentam uma cor azul, porém pode ser encontrada de outras cores dependendo do tratamento antirreflexivo empregado (SOUZA, 2017).

Figura 8 - Célula fotovoltaica de silício policristalino



Fonte: PORTAL SOLAR, 2017

As células policristalinas apresentam eficiência de 15% em média, pouco inferior as células monocristalinas, entretanto seu custo de fabricação é mais barato, o que compensa a redução da eficiência.

2.5.2.3. Filmes Finos

Recentemente, após as tecnologias de cristalinas estarem bem difundidas, surgiram os filmes finos, diferente das células cristalinas, os filmes finos são produzidos através da deposição de finas camadas de materiais sobre uma base rígida. Esse processo de deposição permite que variados tipos de matéria-prima possa ser empregada para fabricar os módulos. A deposição pode ser feita por vaporização ou outros métodos. O custo é relativamente menor, devido ao método empregado que evita desperdícios, como ocorre na serragem dos wafers cristalinos (GHENSEV, 2006).

A fabricação de filmes finos tem um custo menor de energia, visto que a temperatura de fabricação está na faixa de 200 °C e 500 °C, diferente das células cristalinas que necessitam de temperaturas acima de 1200 °C na sua fabricação.

Apesar do baixo custo, a eficiência das células de filmes finos é baixa, conseqüentemente necessitam de uma maior área para geração de energia compara com as outras tecnologias já citadas.

Figura 9 - Módulos fotovoltaicos de filmes finos de silício.



Fonte: ENELSOLUCOES, 2016

2.6 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

Há pouco tempo atrás a energia fotovoltaica era empregada apenas em sistemas isolados ou autônomos, locais onde não se tinha acesso da rede elétrica. Os sistemas autônomos são empregados principalmente em regiões rurais, comunidades isoladas, sistema de sinalização, bombeamento de água e entre outros. Embora os sistemas isolados sejam uma alternativa viável para locais sem acesso a rede elétrica, o melhor uso dessa fonte ocorre com sistemas conectados à rede.

Na metade da década de 1990 é que surgiram os primeiros projetos de fotovoltaicos conectados à rede convencional de eletricidade, firmando no Brasil a importância da implantação dessa tecnologia.

A energia solar no Brasil apresenta uma grande regularidade e pode ser empregado em qualquer parte do território brasileiro. Como a produção de energia elétrica depende da insolação da cidade, podemos dizer que as cidades brasileiras apresentam um grande potencial para a aplicação de energia solar, devido ao seu perfil de consumo energético e pelos níveis de irradiação solar do país.

As regiões Nordeste e Centro-Oeste são as que têm os maiores potenciais de energia solar. Como podemos conferir na Figura 10. Porém, as outras regiões não ficam por baixo e também possuem excelentes valores para insolação. Podemos observar que a Região Sul é a menos favorecida, mas apresenta valores de irradiação maior que Alemanha, que é considerada a nação com a maior potência de energia fotovoltaica.

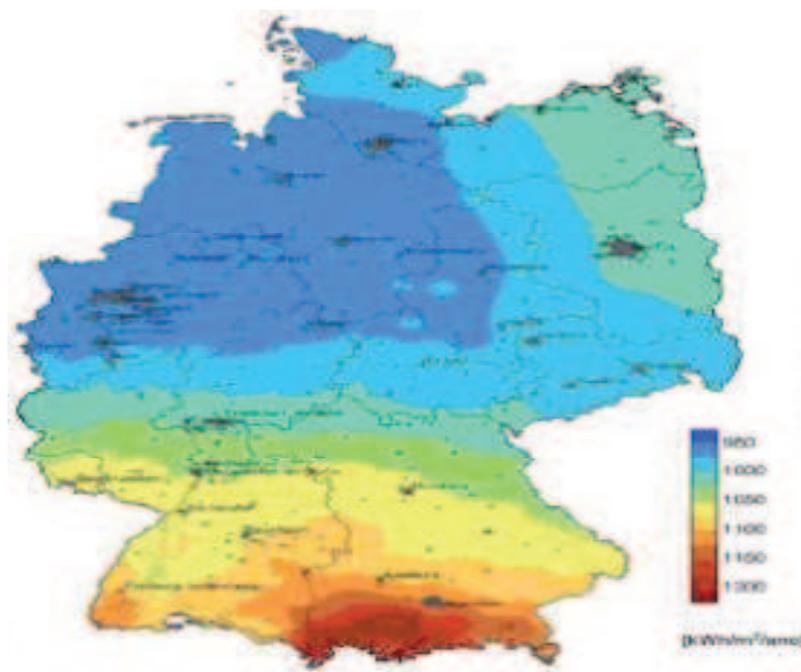
Figura 10 - Mapa de irradiação solar do Brasil



Fonte: RUTHER et al., 2006

A maior irradiação da Alemanha (Figura 11) é de 3500 Wh/m² por dia. A maior parte do território alemão possui menos de 3500 Wh/m² de energia. Em comparação com o Brasil, os dados de insolação diária estão entre 4500 W/h/m² e 6000 W/h/m². (VILLALVA, 2015).

Figura 11 - Mapa de irradiação solar da Alemanha



Fonte: RUTHER; SALAMONI, 2011

É de esperar o potencial de geração fotovoltaica no Brasil, devido as dimensões territoriais e as altas taxas de incidência solar. Potencial de pelo menos dez vezes superior à capacidade instalada na Alemanha, isso representa 200GW de eletricidade oriunda do Sol, o dobro de energia que o brasileiro produz atualmente. (VILLALVA, 2015).

Podemos considerar que no Brasil há muito espaço para o crescimento de Energia Solar Fotovoltaica, além de ser uma energia limpa, é uma opção viável e promissora para ampliar a geração de eletricidade no país. Os sistemas fotovoltaicos podem gerar eletricidade em qualquer local onde seja possível instalar um painel. Telhados de residências, lojas comerciais e coberturas de prédios, além de poder ser construído usinas fotovoltaicas em qualquer área aberta com qualquer dimensão. As condições do clima e todo o espaço territorial é favorável para a expansão da tecnologia no País.

2.6.1 Legislação brasileira

O número de sistemas fotovoltaicos vem aumentando no Brasil, isso devido a aprovação da resolução nº 482 de 2012, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

Segundo a resolução nº 482/2012:

:

Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Uma das principais causas do crescimento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil, além do grande potencial solar, foi o sistema de compensação determinado pela ANEEL. O sistema de compensação é quando a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.

A metodologia conhecida como tarifação *net metering* adotado por muitos países, como o Brasil, consiste num medidor bidirecional que registra a energia injetada pelo sistema fotovoltaico e a energia consumida de rede elétrica pública. Permitindo que o cliente injete energia elétrica através do seu gerador solar durante o dia, gerando créditos para que seja abatido na sua conta de energia no final do mês, tornando um sistema viável para se investir, visto que o valor pago a concessionária de energia seja apenas a diferença do que consumiu e do que gerou, caso a residência ou empresa tenha consumido mais do que gerado. Ou caso tenha gerado mais do que consumiu, gerando um excedente, poderá ser utilizado em outro local com mesmo CPF ou CNPJ do proprietário do SFCR, segundo a resolução nº 482/2012 da Aneel.

A resolução define as modalidades que possam ser implementadas os sistemas fotovoltaicos conectados à rede, são elas:

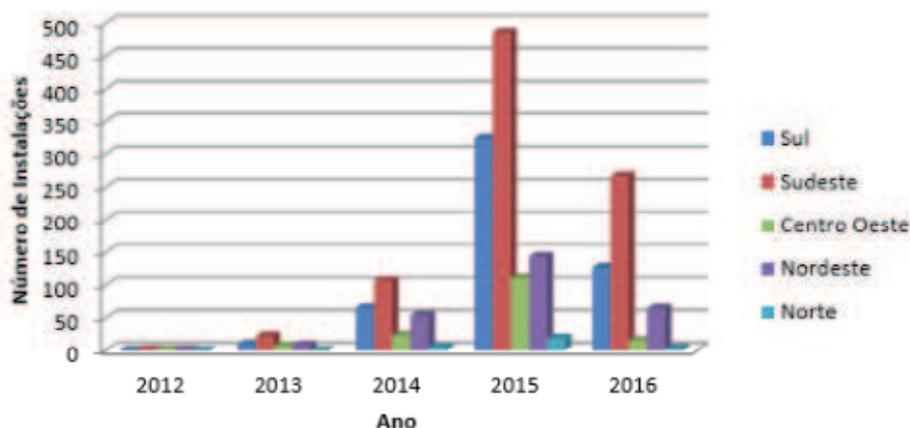
Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento;

Geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

Desde quando entrou em vigor a Resolução Normativa nº 482/2012, a cada ano houve um crescimento considerável do número de instalações fotovoltaicos no Brasil, que teve seu ápice em 2015, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Homologações de sistemas fotovoltaicos por região



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017

3. SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são formados por módulos fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos que variam de acordo com a aplicação do sistema fotovoltaico, como baterias, controladores de cargas, inversores e outros equipamentos de proteção.

3.1.1 Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é composto por agrupamento de células fotovoltaicas para se obter tensões e correntes elétricas úteis para sua utilização. São montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Diferentes arranjos de módulos, conectados entre si em série ou paralelo, podem fornecer até milhões de watts (CEPEL, 2014).

Os módulos fotovoltaicos mais utilizados são formados por células de silício cristalino, normalmente encontrados no mercado de 50W a 330W de potência, apresentam tensões máximas de até 40V e podem fornecer em torno de 8 A de corrente elétrica. A Figura 13 ilustra módulos fotovoltaicos de silício.

Figura 13 - Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalino



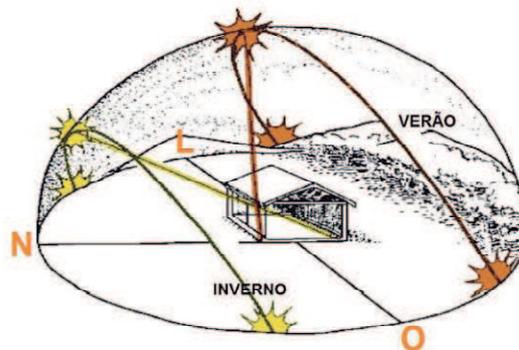
Fonte: Acervo Pessoal, 2017

A garantia fornecida por muitos fabricantes é superior a 20 anos o que torna o equipamento mais confiável de um sistema fotovoltaico, além de apresentar baixa manutenção, apenas limpezas periódicas.

3.1.1.1 Orientação do painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico deve estar direcionado para o equador para que possa captar o máximo de radiação solar. Como se sabe, o sol declina para o norte e para o sul, porém está sempre na faixa entre os dois tópicos (câncer e capricórnio). Sobre a linha do equador, o Sol estará metade do ano declinado para o hemisfério Norte e na outra metade para o hemisfério Sul. Para obter o máximo de captação da radiação solar, no hemisfério Norte, o painel fotovoltaico deverá estar voltado para o Sul, enquanto que no hemisfério sul, deverá estar voltado para o ponto cardinal Norte, visto que também, o sol nasce em leste e se põe em oeste (SOUZA, 2017). A Figura 14 apresenta a orientação do painel fotovoltaico.

Figura 14: Orientação do painel fotovoltaico



Fonte: PORTAL SOLAR, 2016

Um sistema fotovoltaico conectado à rede deve gerar créditos energéticos, por isso deve captar o máximo de energia solar anualmente, porém focando o Sol mais elevado no céu, no período ao Solstício de verão. A inclinação ideal de um sistema de captação varia de acordo com a latitude da localidade, exposta na equação 3:

$$\alpha = 3,7 + (0,69 * \varphi) \quad [3]$$

Onde:

α = Inclinação em graus, em relação ao plano horizontal

φ = Latitude em graus

3.1.2 Baterias

A principal função das baterias, também chamadas de acumuladores eletroquímicos, num sistema fotovoltaico é acumular a energia produzida pelo módulo ou conjunto de módulos fotovoltaicos durante as horas de luminosidade. Ela também tem a função de estabilizar a corrente e tensão no momento de alimentar as cargas elétricas (BRAGA, 2008).

As baterias são classificadas em baterias primárias e secundárias. As primárias compõem as baterias que são utilizadas apenas uma vez, não são recarregáveis. Quando as células primárias se descarregam totalmente, sua vida útil acaba e devem ser descartadas.

As baterias secundárias são recarregáveis, elas podem ser utilizadas várias vezes, sendo carregadas com um auxílio de tensão ou corrente. São chamadas de baterias de armazenamento e são as mais usadas nos sistemas fotovoltaicos, já que demandam longo períodos de funcionamento (SOUZA, 2017). A Figura 14 ilustra a bateria estacionária.

Figura 15 - Bateria Estacionária



Fonte: HELIAR, 2017

As baterias podem ser agrupadas em série ou paralelo para formar bancos de bateria. A associação em paralelo permite acumular mais energia ou fornecer mais corrente elétrica com a tensão igual e a associação em série fornece tensões maiores, ou seja, em série soma-se as tensões de cada bateria e a corrente do conjunto é igual a fornecida por apenas uma bateria. Geralmente são encontradas no mercado tensões de 12 V, 24 V, e 48 V. Na conexão em paralelo as correntes são somadas e a tensão do banco de baterias é a mesma de uma bateria individual. Geralmente são

empregas para proporcionar capacidades maiores de correntes elétricas e manter um nível mais baixo de tensão.

Existem dois tipos mais usuais de baterias secundárias, que são as baterias de Chumbo-ácido e as de Níquel-Cádmio.

3.1.2.1 Baterias de Chumbo-Ácido Estacionária

Essa bateria de chumbo-ácido (Figura 16) é a mais difundida no mercado e mais utilizado nos sistemas fotovoltaicos autônomos. São assim denominadas porque a sua matéria ativa é o chumbo, e o eletrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico. A bateria é composta por células individuais com tensão nominal de 2 V cada banhadas por eletrólito. Os elementos são interligados dentro da bateria de forma a definir a sua tensão e a capacidade nominal (SOUZA, 2017).

Figura 16 - Bateria Chumbo-ácido



Fonte: INTELBRAS, 2017

A bateria de Chumbo-ácido estacionária tem aspecto semelhante com as de automóveis, porém existe diferenças importantes entre esses dois tipos. Nos sistemas fotovoltaicos não se usa baterias automotivas convencionais, isso porque a bateria automotiva foi projetada para fornecer, em curto período de tempo, elevada corrente elétrica e durante a partida do motor de um carro, as baterias sofrem rápidas descargas. Se forem utilizadas para fornecer corrente em um longo período de tempo, as placas contidas nas baterias, irão se deslocar devido as forças mecânicas e a bateria será danificada (VILLALVA, 2015).

Em contrapartida, segundo a NBR 14298/1999, as baterias estacionárias são projetadas para fornecer, em longo período de tempo, correntes elétricas constantes. No caso, as baterias estacionárias foram elaboradas para descarregarem completamente inúmeras vezes, algo que não é possível numa bateria automotiva.

A bateria estacionária foi elaborada especificamente para sistemas fotovoltaicos, podendo ser utilizada por um longo período de tempo até atingir sua menor capacidade de carga máxima e não ser danificada. Além disso, a bateria estacionária possui uma taxa autodescarga menor do que a automotiva, com isso a carga elétrica é preservada por mais tempo mesmo quando ela não está em uso. Então na prática, nos sistemas fotovoltaicos as cargas elétricas são protegidas pelo controlador de carga mesmo quando ela não esteja em uso.

3.1.2.2 Baterias de Níquel-Cádmio

Outro modelo de bateria também empregado nos sistemas fotovoltaicos são as baterias de níquel-cádmio. Essas são mais caras do que as baterias de chumbo-ácido, por isso são pouco utilizadas. Apresentam estrutura física semelhante à das baterias de chumbo-ácido, a diferença que ao invés de placas de chumbo, são utilizadas placas positivas de hidróxido de níquel, óxido de cádmio para as placas negativas e hidróxido de potássio como eletrólito.

As baterias de níquel-cádmio apresentam inúmeras vantagens em relação as de chumbo-ácido o que as tornam atrativas, porém caras. Essas vantagens são: permitem descargas mais profundas, longo tempo de vida útil, suportam elevadas temperaturas e não necessitam de uma tensão de regulação de carga (SOUZA, 2017).

As baterias de níquel possuem uma densidade de carga maior, por consequência são menores do que as baterias de chumbo, por isso só são utilizadas em sistemas fotovoltaicos específicos que apresentam pouca área de instalação e necessitam de pouca manutenção (VILLALVA, 2015).

3.1.3 Controladores de Cargas

Os sistemas fotovoltaicos com baterias devem, obrigatoriamente, serem conectados a controladores de cargas. Esse dispositivo tem objetivo de proteger a bateria contra cargas e descargas excessivas, aumentando a sua vida útil. O

controlador de carga deve desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria atingir seu limite e interromper o fornecimento de energia quando a bateria atingir seu nível mínimo de segurança.

Para especificar o controlador de carga (Figura 17), antes é importante definir o tipo de bateria que será utilizada, posteriormente, determina-se a tensão e a corrente de operação do sistema. Quando se tem elevados valores de corrente elétrica, o custo de controlador será maior e a disponibilidade desse tipo de controlador reduz-se. Escolher controladores com características desnecessárias só deixaram o sistema mais complexo e elevarão o custo.

Figura 17 - Controlador de Carga



Fonte: MINHA CASA SOLAR, 2017

3.1.4 Inversores

Os inversores são dispositivos que fornecem energia elétrica em corrente alternada (CA) a partir do recebimento de uma fonte de energia em corrente contínua (CC), visto que, a maior parte dos equipamentos que consumimos são construídos para trabalhar com CA e como os módulos fotovoltaicos geram CC, então a principal função do inversor é transformar a corrente contínua em corrente alternada.

A tensão CA de saída deve apresentar amplitude, frequência adequados às cargas que receberam a energia gerada. Nos casos dos sistemas conectados à rede a tensão de saída do inversor deve estar sincronizada com a tensão da rede.

De modo geral, os inversores podem ser aplicados em sistemas isolados e conectados à rede, embora apresentem o mesmo princípio de funcionamento, eles

possuem características específicas para atender às exigências das concessionárias de energia.

Segundo Zilles et al. (2012), o inversor pode ser considerado o coração do sistema fotovoltaico. E a sua seleção é de extrema importância para garantir um bom desempenho em termos de produtividade e segurança. No momento do dimensionamento deve-se considerar características importantes para selecionar o inversor mais adequado para os níveis de tensão e corrente, eficiência de conversão, flexibilidade de instalação, durabilidade.

Além disso, esse dispositivo tem também a função de manter o seguimento do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico, ou seja, faz com que sempre entre no inversor, a máxima potência que o gerador pode fornecer em determinado momento. A Figura 18 apresenta o inversor interativo.

Figura 18 - Inversor Interativo



Fonte: FRONIUS, 2017

3.1.5 Outros Componentes

Além desses equipamentos já citados, para um bom funcionamento de um sistema fotovoltaico são necessários outros elementos, como as chaves, fusíveis, disjuntores, que protegem todo o sistema de surtos de corrente e/ou tensão.

As chaves têm a função de interromper o fluxo de corrente em caso de emergência ou para manutenção.

Os fusíveis e/ou disjuntores protegem os equipamentos e cabos contra as correntes altas provocadas por curto-circuito, elevado consumo ou erro no aterramento.

Normalmente esses elementos são acoplados numa caixa chamada de string box. (Figura 19).

Figura 19 - String Box



Fonte: PHB SOLAR, 2017

- 1- Dispositivo de Proteção contra Surtos (Corrente Contínua)
- 2- Chave Seccionadora
- 3- Dispositivo de Proteção contra Surtos (Corrente Alternada)

3.2 Configurações de um sistema fotovoltaico

Conforme a NBR 11704:2008, que classifica os sistemas de conversão de energia fotovoltaica e descreve um resumo dos exemplos de classificação dos sistemas fotovoltaicos, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas modalidades: sistemas isolados ou autônomos e os sistemas conectados à rede (SFCR). A utilização de cada um desses sistemas dependerá da finalidade do uso, da questão econômica e das características de projeto.

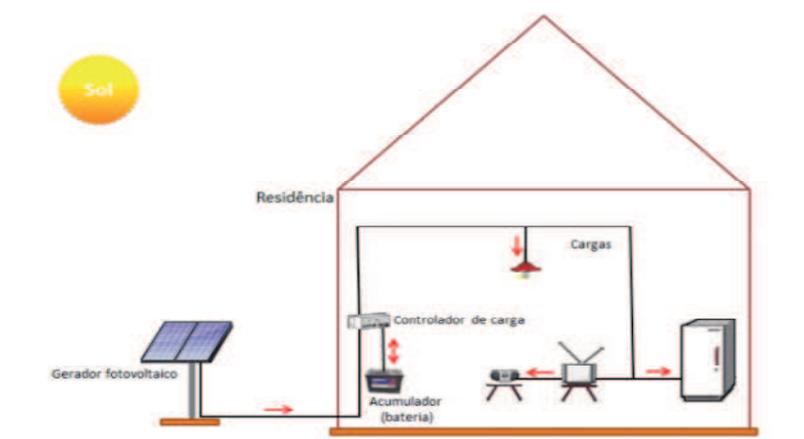
3.2.1 Sistemas Isolados

Também conhecidos como autônomo, os sistemas fotovoltaicos isolados são utilizados em locais que a energia da distribuidora não está disponível, por isso necessitam de um tipo de armazenamento. O armazenamento pode ser utilizado por baterias quando se deseja utilizar os aparelhos elétricos em períodos em que não ocorre a geração fotovoltaica.

Um sistema fotovoltaico autônomo ou isolado é composto basicamente por um arranjo de placas fotovoltaicas, um inversor, um controlador de carga e um banco de baterias.

A Figura 20 ilustra o esquema de um sistema fotovoltaico isolado básico.

Figura 20 - Diagrama simplificado do sistema fotovoltaico autônomo



Fonte: CRESESB, 2014

3.2.2 Sistemas Conectados à Rede

Objetivo principal desse estudo, os sistemas conectados à rede têm uma grande vantagem em relação aos sistemas isolados por não precisarem de baterias e controladores de cargas, com isso os custos para adquiri-lo já reduzem consideravelmente, além de serem mais eficientes e garante que toda a energia seja utilizada, ou no local que está instalado ou em outro ponto da rede.

Pelo fato de não possuir dispositivo de armazenamento, toda a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é enviada para rede elétrica da concessionária. Com isso o medidor de energia passa a ser bidirecional, ou seja, é contabilizado a energia gerada

pelo sistema e a quantidade de energia consumida da rede elétrica pela casa ou empresa.

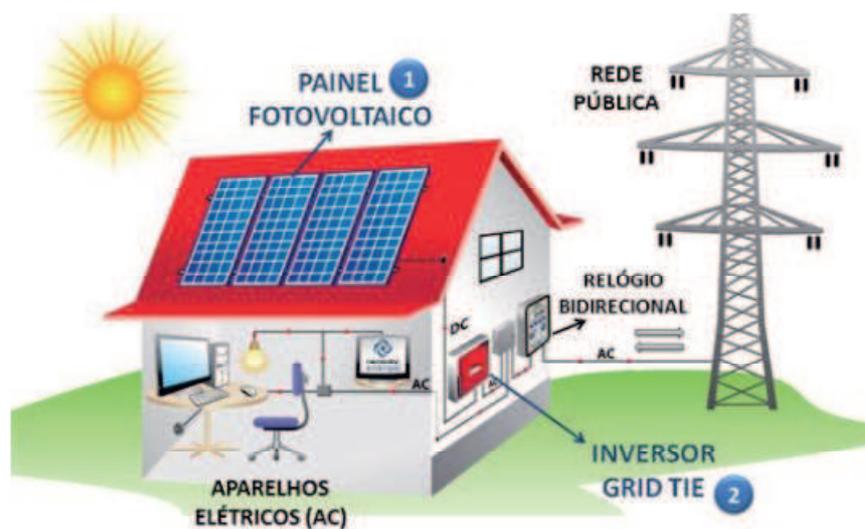
Essa modalidade de instalação vem se tornando cada vez usual em diversos países. As potências instaladas vão de pequeno kWp (kilowattpico) em instalações residenciais e empresariais, até alguns MWp (megawattpico) em grandes sistemas operados por empresas.

Esse tipo de sistema é regulamentado pela resolução normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de 17 de abril de 2012, que é quem define o mecanismo de compensação de energia.

Os SFCR possuem dispositivos mais sofisticados de interface por funcionarem em paralelo com a rede elétrica, que apresentam sistemas de proteção que evitam o ilhamento, que é o funcionamento do sistema na ausência de eletricidade na rede. Por isso, o SFCR não funciona sem está conectado a rede, sendo totalmente dependente da rede elétrica.

Resumidamente um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) funciona gerando energia elétrica pela luz do Sol e injetando-a na rede de distribuição. Como apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Funcionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: NEOSOLAR, 2017

Geralmente os geradores fotovoltaicos são constituídos associando módulos fotovoltaicos em série, até conseguir a tensão desejada, posteriormente é feita a associação em paralelo das várias associações feitas em série, até conseguir a

corrente elétrica desejada. De forma geral, a dimensão do gerador fotovoltaico é caracterizada por sua potência nominal, que é expressa em kWp, que corresponde à multiplicação da quantidade de placas pela potência individual da placa utilizada no projeto. Porém, a potência que é fornecida por esses sistemas varia de acordo com as condições que estão submetidas, como a irradiação solar diária e a temperatura ambiente (ZILLES et al., 2012).

4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

O condomínio residencial horizontal (Figura 22), objeto deste estudo, é localizado na cidade de Campina Grande no estado da Paraíba. Latitude: 7,2 ° S e Longitude: 35,89° O. Possui 185 lotes e conta com uma área construída aproximadamente de 16,72 hectares e contém academia, quadra poliesportiva, campo de futebol, quadra de tênis, piscina olímpica, salão de festas e sala de jogos.

Figura 22 – Condomínio Residencial Horizontal



Fonte: GOOGLE EARTH, 2017. Modificado pelo autor

Temos como objetivo de que o dimensionamento do sistema fotovoltaico se adeque a capacidade de geração de energia elétrica com a demanda desejada,

levando em consideração o consumo energético, disponibilidade do recurso solar, disponibilidade de área, temperatura e equipamentos necessários. Dessa forma, propõe-se um conjunto de equipamentos que, além de atender as normas, irão realizar de maneira eficiente a conversão da luz solar em energia elétrica utilizando um sistema conectado à rede da concessionária de energia da região, através da metodologia de cálculo de Ronilson di Souza (2017), para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectado à rede.

4.1 Dados de consumo energético

Para iniciar o dimensionamento do sistema fotovoltaico, é necessário analisar o histórico de consumo de energia elétrica da unidade consumidora nos últimos doze meses (Tabela 1). Foi fornecido pela administração do condomínio a conta de luz atual, com isso percebe-se que o condomínio apresenta dois medidores de energia.

Tabela 1 - Consumo mensal de energia elétrica

Medidor 1		Medidor 2	
Mês	Consumo (KWh)	Mês	Consumo (KWh)
out/16	11749	out/16	1989
nov/16	14183	nov/16	2950
dez/16	13764	dez/16	2482
jan/17	13938	jan/17	2538
fev/17	12720	fev/17	2179
mar/17	14185	mar/17	2220
abr/17	12824	abr/17	2047
mai/17	15146	mai/17	2860
jun/17	13716	jun/17	2195
jul/17	14918	jul/17	2025
ago/17	13448	ago/17	2053
set/17	13791	set/17	2423
Média	13699	Média	2330

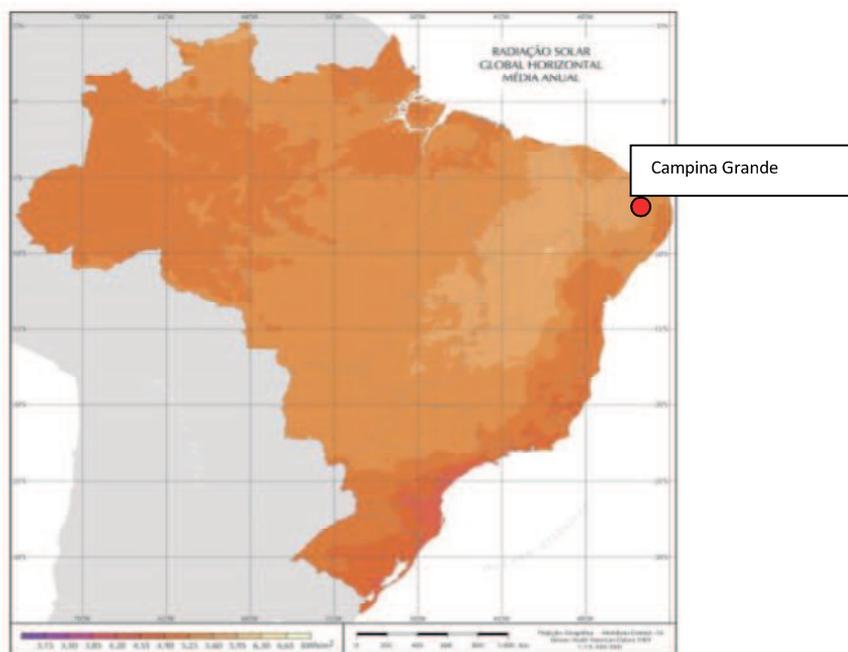
Fonte: ENERGISA, 2017. Adaptado pelo autor

Somando os dois valores médios dos medidores de energia, teremos 16.029 KWh (Kilowatthora) como consumo médio de todo o condomínio. Esse será um valor médio aproximado que o sistema fotovoltaico deverá gerar durante seu funcionamento ao longo do mês.

4.2 Incidência solar em Campina Grande

A cidade de Campina Grande está localizada no agreste do estado da Paraíba. Nessa região encontra-se um ótimo nível de radiação solar, como é possível constatar pelo mapa da figura 23. A região de Campina Grande possui uma radiação solar global horizontal que varia de 4,90 a 5,25 KWh.m⁻², conforme visualizado na Figura 23.

Figura 23 - Mapa da Radiação Solar Global Horizontal

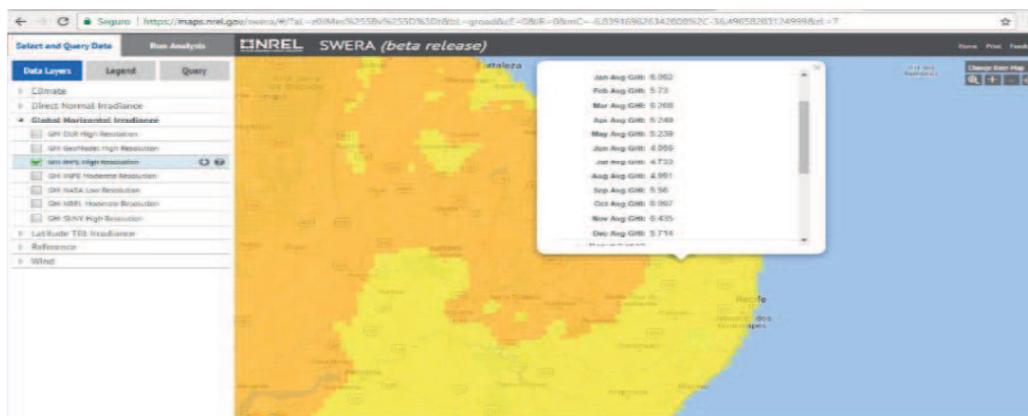


Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2006

Os dados de radiação solar que incidem no local onde serão instalados os módulos fotovoltaicos foram coletados através da base de dados do SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment). É uma ferramenta muito prática para obtenção de dados de irradiação solar de qualquer lugar do mundo.

A características elétrica dos módulos são ligadas a dados de irradiância, que em sua maioria, são apresentados em valores mensais de energia acumulado durante o dia, não levando em conta as variações que possam ocorrer, como por exemplo o sombreamento através de uma nuvem. A Figura 24 ilustra nos dados de irradiação solar obtidos com a ferramenta SWERA.

Figura 24 - Dados de irradiação solar obtidos com a ferramenta SWERA



Fonte: SWERA, 2017

Portanto, os valores são expressos em Horas de Sol Pico (HSP), esta grandeza representa o número de horas que a irradiância permanece constante e igual a 1000 W/m². (VILLALVA, 2015). A Tabela 2 apresenta os valores mensais de irradiação solar obtidos no SWERA.

Tabela 2: Valores mensais de Irradiação Solar obtidos no SWERA

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Irradiação Solar (kWh/m²)	6,19	5,67	6,32	5,32	5,13	4,0	4,67	5,01	5,40	6,03	6,50	5,66	5,50

Fonte: SWERA, 2017. Adaptado pelo autor

No caso, para o sistema a ser implantado no condomínio localizado em Campina Grande – PB, esse valor é encontrado na sua média em 5,501 KWh/m².

4.3 Estudo de área disponível

O estudo foi feito para analisar as possíveis áreas disponíveis para a instalação dos módulos fotovoltaicos. Foram feitas medições de comprimento e largura de telhados, sua orientação geográfica e a inclinação.

Área 1: Telhado da portaria, conforme observado nas Figuras 25 e 26.

- Dimensões: 24,7m x 19,5m
- Área: 481,65 m²

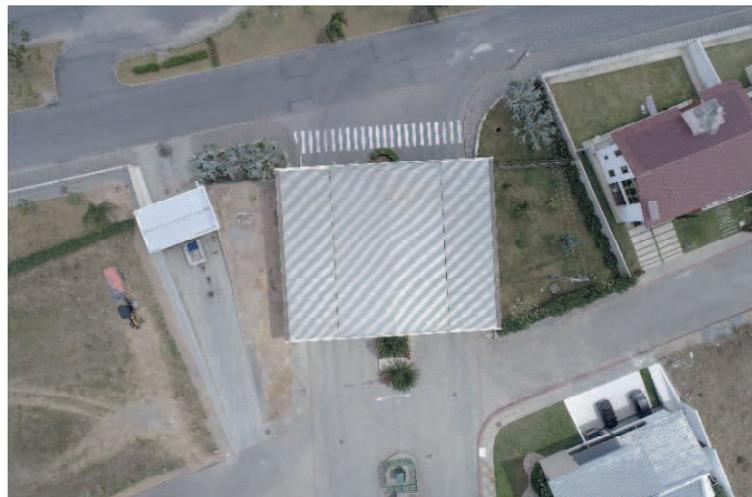
- Inclinação: Plana
- Orientação: 0°
- Estimativa da quantidade de placas possíveis de ser instalado: Levando em consideração uma placa de 330 W de 2m x 1m (área = 2m²), dividindo a área total do telhado pela área de uma única placa, temos aproximadamente 240 placas possíveis de serem instaladas.

Figura 25 - Telhado da portaria



Fonte: Acervo pessoal, 2017

Figura 26 - Vista de cima do telhado da portaria



Fonte: Acervo pessoal, 2017

Área 2: Telhado da academia e salão de festas (Figura 27)

- Possui três águas. Duas voltadas para o sul e uma volta para o norte

- Dimensões telhado sul: 20m x 19m
- Área telhado sul: 380m², como são duas águas de mesmas dimensões, então temos 760m³ de área nos telhados voltados para o sul
- Dimensões telhado norte (Figura 29) temos: 11,5m x 28m
- Área telhado norte: 322m².
- Inclinação telhado Sul (Figuras 28a e 28b): 10°
- Inclinação telhado norte (Figura 29): 15°
- Estimativa da quantidade de placas possíveis de ser instalado: Levando em consideração uma placa de 330 W de 2m x 1m (área = 2m²), dividindo a área total do telhado sul pela área de uma única placa, temos aproximadamente 190 placas possíveis de serem instaladas em cada água do telhado sul, ou seja, 380 placas totais.
- Como podemos observar na figura 29, o telhado voltado para o norte apresenta instalações de aquecedores solares para a água da piscina, ocupando uma área aproximada de 56m², com isso restariam 266m² para ser instalados os módulos fotovoltaicos. Ou seja, 133 placas possíveis de serem instaladas.

Figura 27 - Telhado da academia e salão de festas



Fonte: Acervo pessoal, 2017

Figura 28a e 28b - Telhado Sul com inclinação de 10°



Fonte: Acervo pessoal, 2017

Figura 29 - Telhado Norte com inclinação de 15°



Fonte: Acervo pessoal, 2017

De forma resumida temos as seguintes características das áreas, conforme visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Áreas disponíveis e suas características

Local disponível	1	2		
Orientação	0	Sul (1)	Sul (2)	Norte
Área total (m ²)	481,65	380	380	266
		1026		
		1563,65		
Inclinação	0	10°	10°	15°
Orientação	0	162° S	162° S	336° NO
Quantidade de placas	240	513		
		753		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

De posse de todas essas informações de dados de entrada, como consumo médio local, horas de sol pico e possíveis área de instalação dos painéis fotovoltaicos, determinam-se a quantidade de placas fotovoltaicas, o inversor interativo e a potência nominal de geração.

- **Passo 1:** Determinar a energia de compensação mensal e diária. Haverá sempre um valor a ser pago à distribuidora, que é a contribuição de iluminação pública e o custo de disponibilidade, que varia de acordo com o tipo de ligação entre a unidade consumidora e a rede.

Tabela 4 - Custo de disponibilidade

Tipo de ligação	Custo de disponibilidade (KWh/mês)
Monofásico	30
Bifásico	50
Trifásico	100

Fonte: SOUZA, 2017

- **Passo 2:** A energia de compensação que é o valor de energia elétrica a ser gerada pelo SFCR, e que significa economia real, sendo assim, é interessante “não gerar toda a energia consumida”, mas somente um valor (energético) acima do valor relativo ao “Custo de Disponibilidade”. Chega-se então à equação [4], que demonstra o melhor valor para a chamada “Energia de compensação”, ou seja, o valor de energia elétrica a ser gerada pelo SCFR, e que significa a economia real:

$$E_c = E_{mm} - CD \quad [4]$$

Onde:

E_c = Energia de Compensação em média mensal – em KWh/mês

E_{mm} = Consumo de Energia em Média Mensal – em Kwh/mês

CD = Custo de Disponibilidade – em KWh/mês

Como o tipo de ligação do condomínio é trifásico, adota-se 100 kWh/mês

- **Passo 3:** Energia de Compensação diário (Equação 5):

$$E_{cd} = \frac{E_c}{30} \quad [5]$$

Onde:

E_{cd} = Energia de compensação em média diária – em KWh/dia

- **Passo 4:** Inclinação ideal do painel solar fotovoltaico. Como vimos na equação [3] e a latitude da cidade de Campina Grande é 7,22° S, então:

$$\alpha = 8,68^\circ$$

Porém, é desejável uma inclinação sempre acima de 10°, pois abaixo desse valor o painel está mais sujeito a pegar poeira e sujeira. A depender da região, é utilizado no mínimo 15°, mesmo perdendo energia na geração por conta da inclinação. É mais vantajosa essa perda do que a perda do acúmulo de sujeira. (SOUZA, 2017)

Como sabe-se que o painel, preferencialmente, deve estar voltado para o norte, para uma maior captação e ter uma inclinação mínima para evitar o acúmulo de sujeira, prioritariamente será utilizado a área do telhado da portaria do condomínio (Figuras 25 e 26), por possuir uma maior dimensão e poder orientar o módulo para o norte na inclinação ideal, que será adotado 15°.

Na maioria das vezes, o valor da inclinação do arranjo fotovoltaico é diferente da latitude local. Por esse motivo que, para estimativas de geração de energia, deve-se considerar tanto o valor de radiação solar disponível no local para o plano horizontal (Figura 24) quanto o valor da radiação solar no local exato que será instalado o sistema de captação. Então deverá ser considerada uma modelagem matemática utilizada na hora do dimensionamento do SCFR, que é uma correção através de uma tabela que tem fatores para superfície inclinada.

Como a latitude de Campina Grande é 7,22°, utilizaremos a tabela 5 com latitude 7 e inclinação 15°.

Tabela 5 - Fatores de correção para superfície inclinada

Latitude γ	INC.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dec
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	5	0,99	0,99	1,01	1,02	1,03	1,03	1,03	1,02	1	0,99	0,98	0,97
10	10	0,97	0,97	1	1,04	1,06	1,06	1,05	1,03	1	0,97	0,95	0,94
15	15	0,95	0,95	0,99	1,04	1,07	1,08	1,06	1,03	0,99	0,95	0,91	0,89
20	20	0,91	0,91	0,98	1,04	1,08	1,09	1,07	1,03	0,98	0,92	0,87	0,85
25	25	0,88	0,88	0,96	1,04	1,09	1,1	1,07	1,02	0,96	0,88	0,82	0,79
30	30	0,83	0,83	0,93	1,02	1,08	1,1	1,06	1,01	0,93	0,84	0,77	0,73
35	35	0,78	0,78	0,89	1	1,07	1,09	1,05	0,99	0,9	0,79	0,71	0,67
40	40	0,73	0,73	0,85	0,97	1,06	1,07	1,03	0,96	0,86	0,74	0,64	0,6
45	45	0,67	0,67	0,81	0,94	1,03	1,05	1,01	0,93	0,81	0,68	0,57	0,53
50	50	0,6	0,6	0,75	0,9	1	1,02	0,98	0,89	0,76	0,62	0,5	0,45
55	55	0,54	0,54	0,7	0,85	0,96	0,99	0,94	0,84	0,71	0,55	0,43	0,38
60	60	0,46	0,46	0,63	0,8	0,92	0,95	0,9	0,79	0,65	0,48	0,35	0,3
65	65	0,39	0,39	0,57	0,75	0,87	0,9	0,85	0,74	0,58	0,41	0,27	0,21
70	70	0,31	0,31	0,5	0,68	0,81	0,85	0,8	0,68	0,52	0,34	0,19	0,13
75	75	0,23	0,23	0,42	0,62	0,75	0,79	0,74	0,62	0,45	0,26	0,12	0,11
80	80	0,15	0,15	0,35	0,55	0,69	0,73	0,68	0,55	0,38	0,18	0,11	0,1
85	85	0,09	0,09	0,27	0,47	0,62	0,66	0,61	0,48	0,3	0,12	0,1	0,09
90	90	0,08	0,08	0,19	0,4	0,55	0,59	0,54	0,41	0,23	0,11	0,09	0,09

Fonte: SOUZA, 2017

Os valores em destaques multiplicam-se pelos valores de radiação solar mês a mês contidos na Tabela 2. Dessa forma, obtemos a radiação solar corrigida (Tabela 6):

Tabela 6 - Multiplicação dos valores de radiação solar por fatores de correção no plano inclinado

Incli.	Jan	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média
0º	6,19	5,67	6,32	5,32	5,13	4,05	4,67	5,01	5,40	6,03	6,50	5,66	5,50
Fator	0,95	0,95	0,99	1,04	1,07	1,08	1,06	1,03	0,99	0,95	0,91	0,89	0,99
15	5,88	5,39	6,26	5,54	5,50	4,38	4,95	5,16	5,35	5,73	5,92	5,04	5,46

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

É necessário considerar esses fatores de correção, pois caso não seja considerado a influência de posicionamento do arranjo fotovoltaico, tendem a subestimar, no Brasil, a radiação solar nos meses de inverno, e superestimar os valores dos meses de verão.

Após esse procedimento, pode-se calcular a potência pico preliminar do sistema fotovoltaico, considerando 5,46 kWh/m²/dia de Horas de Sol Pico médio anual.

- **Passo 5:** Potência Pico preliminar (Equação 6):

$$P_p = \frac{E_{cd}}{HSP} \quad [6]$$

Onde:

P_p = Potência-pico do SFCR – em kWp (quilowatts-pico – referente à potência em condições de laboratório dos módulos fotovoltaicos)

E_{cd} = Energia de compensação em média diária – em kWh-dia

HSP = valor médio anual da radiação solar – em kWh/m²/dia

- **Passo 6:** Quantidade de módulos Fotovoltaicos (valor preliminar) (Equação 7), adotando as placas da marca Canadian, modelo MAXPOWER CS6U de 330 W de potência.

$$N_m = \frac{P_p}{\frac{W_p}{1000}} \quad [7]$$

Onde:

N_m = Número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados

P_p = potência-pico do SFCR – em kWp

W_p = potência-pico do modelo do módulo fotovoltaico – em Wp (watt-pico)

1000 = constante para ajuste de unidade (1 kW = 1000 W)

- **Passo 7:** Compensação por fator de temperatura

Depois de ter selecionado o modelo do módulo fotovoltaico, podemos então fazer a compensação por fator de temperatura e estimar novos valores, considerando a temperatura ambiente do local de instalação, bem como os limites internacionais de temperaturas para projeto de SFCR.

Considera-se 25° C como sendo a diferença positiva de temperatura entre as células fotovoltaicas e o meio ambiente em que os módulos fotovoltaicos serão instalados. É importante referir que a temperatura atrás dos módulos influencia no seu rendimento. É necessário o resfriamento natural das células fotovoltaicas para garantir o funcionamento ideal das placas. A Tabela 7 demonstra a real influência de cada tipo de sistema de fixação na diferença de temperatura:

Tabela 7 – Temperatura por tipo de fixação

	Tipos de fixação	T °C
a	Estrutura totalmente elevado (solo)	22
b	Laje ou telhado (com espaço/inclinação)	28
c	Sobre o telhado (com ventilação)	29
d	Integrado (sem ventilação)	32

Fonte: SOUZA, 2017

As imagens abaixo demonstram cada um dos tipos de fixação para painéis solares (Figura 30), citados na tabela 7:

Figura 30: Tipos de estrutura fixação para painéis solares



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

- **Passo 8:** Temperatura de Cálculo:

A temperatura de cálculo para a compensação da potência-pico será obtida de acordo com a Equação 8:

$$T_{calc} = T_{amb} + (\Delta t - T_{ref}) \quad [8]$$

Onde:

T_{calc} = temperatura considerada para o cálculo das diferenças de características entre os valores nominais e os valores em condições reais de operação.

T_{amb} = temperatura ambiente da localidade de instalação dos módulos fotovoltaicos

Δt = diferença de temperatura entre as células fotovoltaicas e a temperatura ambiente, com influência do tipo de fixação utilizada.

T_{ref} = temperatura de referência para testes de laboratório dos módulos fotovoltaicos, determinado em 25° C, segundo o conjunto de normas internacionais IEC 60904.

- **Passo 9:** Diferença de características em relação ao valor nominal

Para obter-se o valor de diferença entre a potência-pico em condições de laboratório e a estimativa de potência-pico em condições reais de operação, utilizamos a Equação 9:

$$L^{\circ} C_{pmax} = {}^{\circ} C_{wp} * T_{calc} [9]$$

Onde:

${}^{\circ} C_{wp}$ = coeficiente que corresponde a porcentagem que o módulo perde por cada grau de temperatura

De acordo com as informações contidas no catálogo técnico dos módulos, coeficiente de temperatura utilizado é 0,41 % / °C. A Figura 31 ilustra as características de temperatura dos módulos fotovoltaicos.

Figura 31: Características de temperatura dos módulos fotovoltaicos

Coeficiente de temperatura (Pmax)	-0,41 % / °C
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0,31 % / °C
Coeficiente de temperatura (Isc)	0,053 % / °C
Temperatura nominal de operação da célula	45 ± 2 °C

Fonte: CANADIAN SOLAR, 2017. Adaptado pelo autor

- **Passo 10:** Rendimento de potência

Como ocorrerá uma perda de potência, devido à variação negativa, o rendimento do módulo fotovoltaico, em condições reais de operação, será inferior às condições de padrão de teste. Pode-se obter o valor de estimativa através da seguinte equação:

$$R^{\circ}C = 100\% + L^{\circ} C_{pmax} [10]$$

- **Passo11:** Potência-Pico compensada:

A estimativa de potência-pico efetiva, que se chama de potência pico compensada (por fator de temperatura), é obtida mediante a seguinte equação:

$$W_{p,c} = R^{\circ C} * W_{\text{potência das placas}} \quad [11]$$

- **Passo12:** Recalculando a Quantidade de módulos fotovoltaicos para o projeto.

A estimativa de potência-pico, que se chama de potência-pico compensada (por temperatura), é obtida novamente pela equação 7. Multiplicando a quantidade de módulos pela potência da placa adotada, determina-se a potência nominal do sistema, (Equação 12) em kWp:

$$P_{\text{pico}} = \frac{N_m * W_p}{1000} \quad [12]$$

A partir do dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado a rede foi possível calcular os valores pertinentes ao projeto (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores calculados no projeto

Ec (kWh/mês)	15,929
Ecd (kWh/dia)	530,96
α	8,68 °
Pp (kWp)	97,78
Nm	297
Compensação por temperatura	
Tcalc (°C)	28
L° Cpmax (%)	11,48
R° C (%)	88,52
Wp,c (W)	292,11
Número final de módulos	
Nm	335
Potência Nominal do sistema	
Ppico (kWp)	110,6

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

De acordo com esse número de placas, 335 unidades e considerando que as placas Canadian CS6U – 330 W tem dimensões de 1,96m x 0,99m, aproximadamente 2m² de área, então multiplicando a quantidade de placas pela área de uma única placa, seria necessário 670 m² de área aproximadamente para instalar o sistema. Porém, como foi determinado no item 4.3, o telhado da portaria do condomínio

apresenta 481,65 m² e comportaria apenas 240 módulos de 330 W, o que daria uma potência de 79,2 KWp, e que a partir de agora será nomeado de sistema A. Sobrando 95 módulos para serem instalados em outro local, o que seria necessário 190 m² de área e seria uma potência de 31,35 KWp, nomeado de sistema B.

Devido a essa indisponibilidade de área total, será necessário sub-dividir o sistema em dois (sistema A e B). Uma parte do sistema gerando no telhado da portaria e outra parte do sistema gerando no telhado norte do salão de festas e academia, que possui 266 m² de área disponível, e foi escolhido pelo fato de estar orientado para o Norte e ter área disponível suficiente para instalar o sistema restante, de acordo com a Tabela 3.

Como o telhado norte (Figura 29) já apresenta a mesma inclinação do sistema A (15°) e mesma orientação, será preciso apenas recalcular sua potência considerando o fator de temperatura, já que o sistema B será fixado de acordo com a imagem C (sobre o telhado com ventilação) da Figura 30.

Antes de recalcular o sistema B, é preciso estimar a geração de energia elétrica para o sistema A, pois a subtração do consumo média do condomínio (16.029 KWh/mês) pela média estimada da geração do sistema A, será o valor necessário que o sistema B precisará gerar.

4.4. Estimativa de geração do sistema A

A estimativa de geração mensal será calculada de acordo com a Equação 13:

$$G = P_{\text{picoA}} * d * HSP_c * r \quad [13]$$

Onde:

G = geração de energia estimada

P_{picoA} = Potência pico instalada do sistema A

d = quantidade de dias de cada mês

r = rendimento estimado do sistema fotovoltaico conectado à rede, adotado 88%

Tabela 9 - Estimativa de geração de energia elétrica para o sistema A de 79,2 KWp

Geração (KWh / mês)	
Mês	TOTAL
JAN	12.713
FEV	10.519
MAR	13.525
ABR	11.583
MAI	11.883
JUN	9.158
JUL	10.695
AGO	11.149
SET	11.186
OUT	12.380
NOV	12.378
DEZ	10.889
Média mensal (KWh/mês)	11.505
Total Anual (KWh/mês)	138.056

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

Sabe-se que o consumo mensal do condomínio é de 16.029 KWh/mês, como o sistema A irá gerar aproximadamente 11.505 KWh/mês, assim o sistema B de geração será necessário gerar 4.524 KWh/mês.

De posse desse valor, será recalculado a potência nominal do sistema B, considerando o fator de compensação por temperatura.

Após refazer os cálculos, chega-se nos seguintes valores que estão apresentados na Tabela 10:

Tabela 10 - Valores calculados no projeto

Ec (kWh/mês)	4425
Ecd (kWh/dia)	147,5
α	8,68 °
Pp (kWp)	27,18
Nm	83
Compensação por temperatura	
Tcalc (°C)	29
L° C_{pmax} (%)	11,89
R° C (%)	88,11
Wp,c (w)	290,8
Número final de módulos	
Nm	95
Potência Nominal do sistema	
Ppico (kWp)	31,35

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

4.5 Estimativa de geração do sistema B

De acordo com a tabela 11, podemos observar a estimativa de geração de energia elétrica para o sistema B.

Tabela 11 - Estimativa de geração de energia elétrica para o sistema B de 31,35 KWp

Geração (KWh / mês)	
Mês	TOTAL
JAN	5.032
FEV	4.164
MAR	5.354
ABR	4.585
MAI	4.704
JUN	3.625
JUL	4.233
AGO	4.413
SET	4.428
OUT	4.900
NOV	4.900
DEZ	4.310
Média mensal (KWh/mês)	4.554
Total Anual (KWh/mês)	54.648

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

Com isso, soma-se a geração dos dois sistemas e estima-se a geração de energia elétrica dos SFCR do condomínio residencial horizontal e tem-se 16.059 kWh/mês de energia elétrica gerada e uma potência pico total de 110,22 KWp, conforme observado na Figura 32.

Figura 32 - Estimativa de geração de energia elétrica total



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

5 SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR INTERATIVO

O inversor para geração solar a partir de uma fonte de energia em corrente contínua (C.C), como os módulos fotovoltaicos, converte esta energia em uma saída de corrente alternada (C.A), com amplitude e frequência adequada. Como o inversor é conectado à rede elétrica, a tensão de saída do inversor é sincronizada automaticamente com a tensão da rede. Mas, não só a conversão, mas diversas tecnologias são incorporadas a um inversor, como seguidor de máxima potência (MPPT), mecanismo que controla a maximização da potência, aumentando a eficiência do inversor.

A marca escolhida para os inversores foi a ABB. Essa marca foi escolhida por ser líder de mercado, sendo, portanto, facilmente encontrada para aquisição e suporte técnico. Através do simulador virtual da empresa Sices Solar, pode-se verificar a compatibilidade dos módulos Canadian Solar 330W POLY-Si com a marca do inversor escolhido, bem como verificar o número de módulos por string (arranjo das placas fotovoltaicas), visto que os módulos apresentam limites máximos de entrada para tensão, corrente e potência. Ou seja, há um número limite de módulos que possam ser colocados em série e em paralelo. Quando os módulos estão ligados em série, aumenta o número tensão e a corrente é a mesma, quando os módulos estão ligados em paralelo, a corrente aumenta e a tensão permanece constante.

Dessa forma, de acordo com a plataforma virtual, foram determinadas 6 strings de 22 módulos (Figura 32) para o inversor ABB TRIO-33 kW-TL-OUTD-SX-400 - Trifásico 380V (Figura 37) e 6 strings de 18 módulos (Figura 33) para o inversor ABB TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X-400 - Trifásico 380V (Figura 38), totalizando 240 módulos, como representado no diagrama unifilar (Figura 40).

Figura 33 – Simulação do Arranjo fotovoltaico para o sistema A inversor ABB PRO 33.0

Inversor ABB PRO 33.0-TL-OUTD-SX-400 - Trifásico 380V

Operação: MPPT(1) Perdas % FDI

MPPT(1)

CANADIAN SOLAR 72CELI Inclinação 15° Número de strings 6 Perdas % Limites

43.56 kWp 2.57 m² Orientação 0° Módulos por string 22 Editar

Fonte: Sices Solar, 2017

Figura 34 – Simulação do Arranjo fotovoltaico para o sistema A inversor ABB PRO 27,6

Inversor ABB TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X-400 - Trifásico 380V

Operação: MPPT(1+2) Perdas % FDI

MPPT(1+2)

CANADIAN SOLAR 72CELI Inclinação 15° Número de strings 6 Perdas % Limites

35.64 kWp 2.10 m² Orientação 0° Módulos por string 18 Editar

Fonte: Sices Solar, 2017

As figuras 35 e 36 apresentam as faixas de limites de tensão de acordo com as strings caracterizadas pela plataforma para cada inversor do sistema A.

Figura 35: Faixa ótima para entrada de tensão, corrente e potência no inversor ABB 33 kW.



Fonte: Sices Solar, 2017

Figura 36: Limites de entrada de tensão, corrente e potência no inversor ABB 27,6 kW



Fonte: Sices Solar, 2017

Figura 37: Inversor ABB PRO 33.0-TL-OUTD-SX-400 – TRIFÁSICO 380 V



Fonte: ABB, 2017

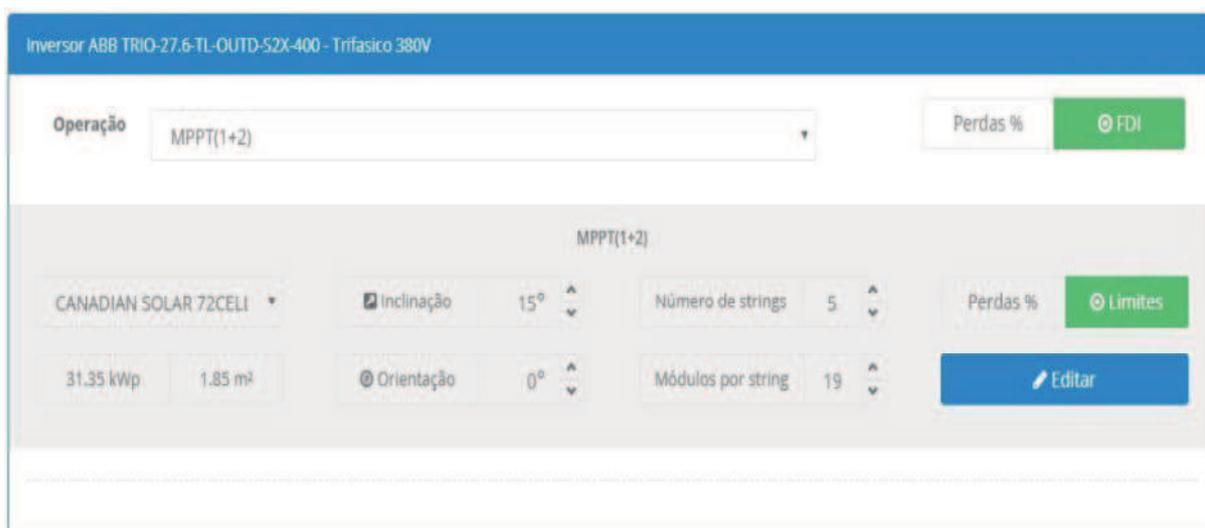
Figura 38 - Inversor ABB TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X-400 - Trifásico 380V



Fonte: ABB, 2017

E para o sistema B, foram determinadas 5 strings de 19 (Figura 39) módulos para um inversor ABB TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X-400 - Trifásico 380V (Figura 38), totalizando 95 módulos, como demonstrado no diagrama unifilar (Figura 42). A Figura 40 ilustra as faixas de limites de tensão de acordo com as strings caracterizadas, pela plataforma para o único inversor do sistema B.

Figura 39 – Simulação do Arranjo fotovoltaico para o sistema B inversor ABB PRO 27,6



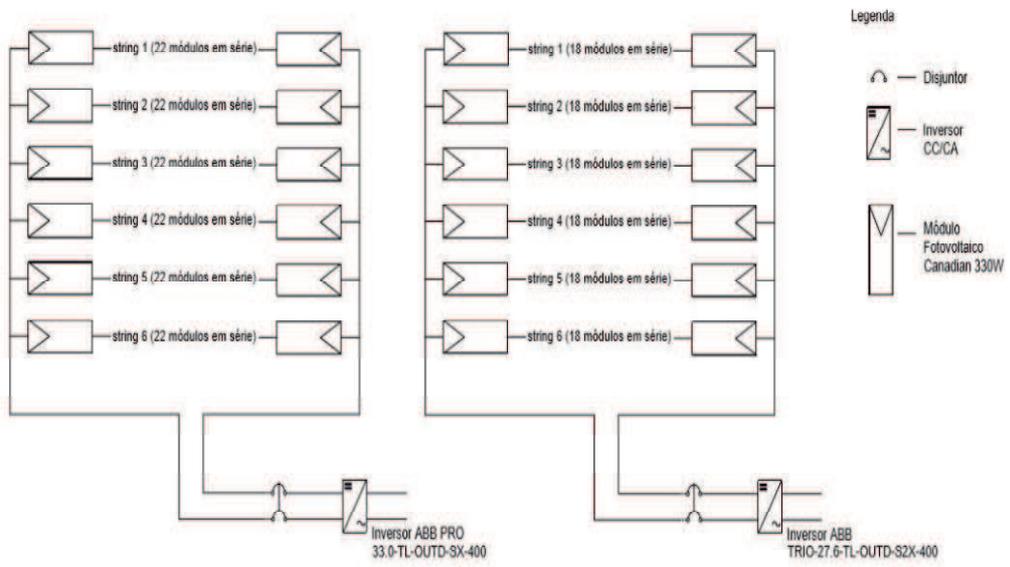
Fonte: Sices Solar, 2017

Figura 40 - Limites de entrada de tensão, corrente e potência no inversor ABB 27,6 kW



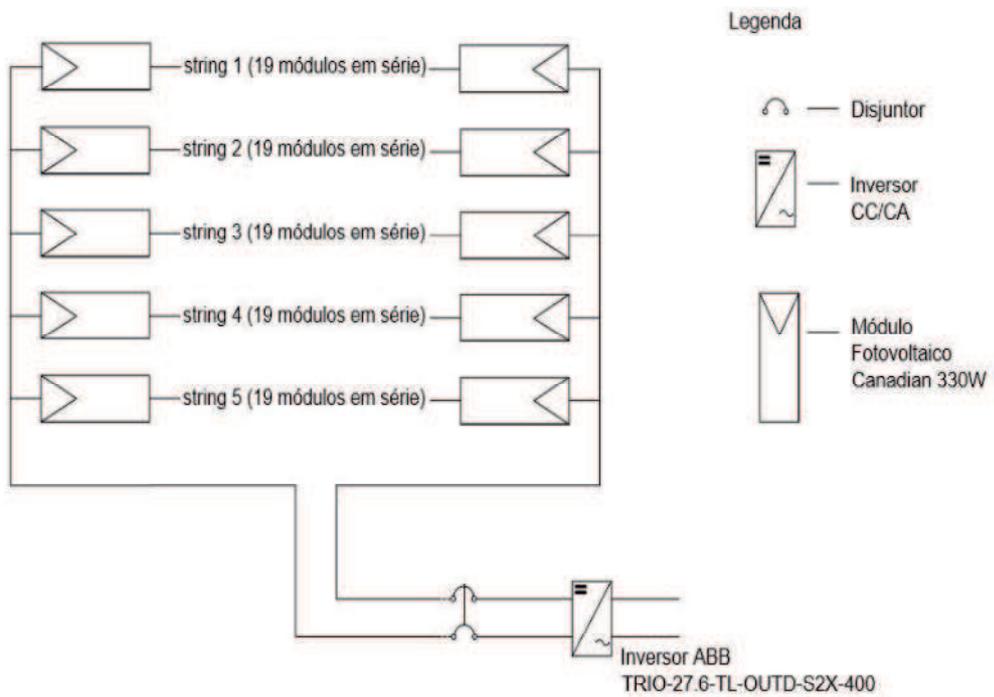
Fonte: Sices Solar, 2017

Figura 41 – Diagrama unifilar para o sistema A



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

Figura 42 – Diagrama unifilar para o sistema B



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

6 CUSTO DO SISTEMA E TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

A análise do custo de implantação de um sistema de geração de energia fotovoltaica se faz necessária visto que o sistema tem como objetivo gerar uma economia mensal no custo de energia elétrica. A partir dos custos do projeto, operação e manutenção do sistema, pode-se avaliar o tempo de retorno do investimento. A Tabela 12 demonstra o custo de implantação.

Tabela 12 - Custos para implantação do sistema

Produto	Custo Unitário	Quantidade	Subtotal
Módulos fotovoltaico CANADIAN 330 W POLY-SI	R\$ 567,20	335	R\$ 190.012,00
Inversores	ABB 26,7 kW	2	R\$ 35.564,44
	ABB 33 kW	1	R\$ 20.719,62
Cabos, conectores	R\$ 4,06	1400	R\$ 5.684,00
Estruturas de fixação	R\$ 44.075,54	1	R\$ 44.075,54
Projeto de Engenharia	R\$ 90.000,00	1	R\$ 90.000,00
Instalação	R\$ 28.000,00	1	R\$ 28.000,00
Frete	R\$ 12.000,00	1	R\$ 12.000,00
Custo Total			R\$ 426.055,60

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

O custo do investimento é estimado em R\$ 426.055,60. Esse custo envolve todas as etapas de implantação do sistema, desde o projeto, aquisição dos equipamentos, mão de obra de instalação e ligação do sistema a rede da concessionária.

No cálculo de tempo de retorno de investimento, foi calculado o Valor Presente Líquido (VPL), apresentado pela Equação 14, que tem como objetivo avaliar se um investimento pretendido tem viabilidade ou não. É definido como sendo o somatório de todos os fluxos de caixas estimados no investimento, calculados a partir de uma taxa dada e de seu período de duração. Essa taxa no caso é a taxa de custo do capital, que para este caso foi usado o valor da inflação (FREIRE, 2009).

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{P}{(1+i)^n} \quad [14]$$

P = Valor principal no tempo de estudo (R\$)

N = Duração do período de análise

i = Taxa de atratividade (%)

A Taxa Interna de Retorno (TIR), conforme observado na Equação 15, é obtida igualando o VPL a 0 e é definida como taxa necessária para igualar o fluxo de caixa antecipado ao valor do investimento, ou seja, ela seria a taxa de retorno do investimento em questão (PUCCINI, 2007).

$$0 = \sum_{n=1}^N \frac{P}{(1+i)^n} \quad [15]$$

P = Valor principal no tempo de estudo (R\$)

N = duração do período de análise

i = Taxa interna de retorno (%)

A taxa mínima de atratividade é uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento, ou o máximo que uma pessoa se propõe a pagar quando faz um financiamento.

A Tabela 13 a seguir ilustra as premissas e taxas que são parâmetros fundamentais para auxiliar o estudo de viabilidade econômica e a confiabilidade do projeto.

Tabela 13 - Premissas e Taxas

Valor da Energia (Ano 0) (reais/ kWh)	R\$ 0,65
Degradação do Painéis Ano 1	1,20%
Degradação outros anos	0,70%
Custo de Manutenção / Ano	0,50%
Inflação Projetada	6%
Inflação Energética Projetada (% a.a.)	10%
Ano de troca do Inversor	15
Custo de Inversor no ano 15	R\$ 56.284,06
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	13%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o investimento em questão, uma Tabela que se encontra no apêndice A foi elaborada aplicando esses conceitos matemáticos-financeiros, com o objeto de encontrar o tempo de retorno do investimento. A Tabela 14 é o resumo desses resultados.

Tabela 14 – Resultados econômicos

Payback Ano		4
Retorno no Primeiro Ano		26,42%
Retorno no Primeiro Ano \$	R\$	112.567,17
Caixa acumulado	R\$	9.387.376,14
Reais por Watt Instalado		R\$ 3,85
VPL(Valor Presente Líquido)	R\$	1.319.622,61
TIR(Taxa Interna de Retorno)		48,22%

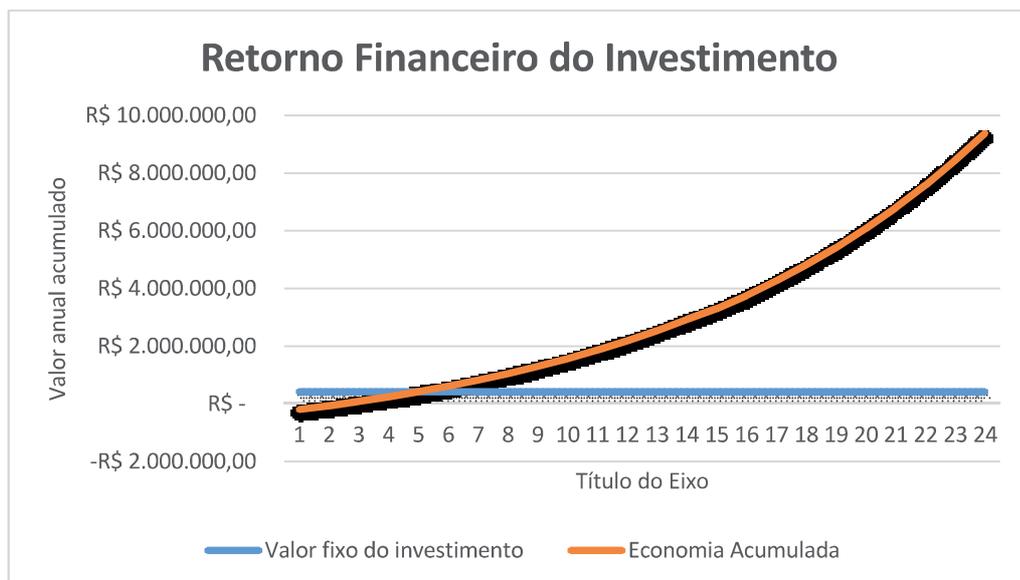
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

É possível observar que o payback é no ano três, ou seja, após quatro anos em operação é que o sistema iniciará um retorno de investimento para o condomínio.

Como a taxa interna de retorno é maior que a taxa mínima de atratividade, representa uma situação bastante favorável e o investimento é recomendado. E como o VPL é maior que 0 mostra que o projeto de investimento é recomendado, pois cobre o investimento inicial com uma sobra bastante vantajosa.

Se considerarmos o valor do investimento fixo, sem variação da tarifa energética, o tempo de retorno do investimento seria aproximadamente no quinto ano, conforme apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Retorno financeiro do investimento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

7 CONCLUSÃO

A necessidade de uso de energia renováveis tem sido cada vez mais essencial devido ao aumento do consumo de energia elétrica e dos problemas ambientais causados principalmente pela queima de combustíveis fósseis.

O uso de energia solar fica comprovado que é uma alternativa muito viável, visto que utilizada uma fonte de energia inesgotável considerando a escala de tempo. Além de apenas utilizar a luz solar para gerar energia elétrica, os módulos fotovoltaicos não causam ruídos e não poluem.

A área útil para instalação dos painéis deve ser analisada com cuidado, pois é importante evitar locais que causam sombreamento e regiões que tenham a orientação para o sul, pois isto reduz o potencial de geração de energia elétrica através da radiação solar.

A análise econômica provou que o projeto é viável e tem um tempo de retorno de investimento pequeno, comparado a longa vida útil comprovada pelos fabricantes de placas fotovoltaicas, após quatro anos de funcionamento o sistema será pago.

Portanto, conclui-se que o sistema fotovoltaico é realizável, beneficia todo o condomínio, pois terão meses que a geração de energia será maior que o consumo, e fará com que o condomínio pague apenas a taxa mínima de disponibilidade, podendo acumular créditos para meses subsequentes em que o consumo será maior que a geração.

Pode-se considerar também que esse sistema é ainda mais vantajoso devido à localização do condomínio, o qual a cidade de Campina Grande apresenta excelentes índices de radiação solar, o que torna o sistema fotovoltaico ainda mais eficiente.

REFERÊNCIAS

ABB: Inversor. 2017. Disponível em: <www.abb.com.br>. Acesso em: 13 nov. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687**. 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL: **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais de microgeração solar fotovoltaicas no horizonte 2017-2024**. 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9>. Acesso em: 18 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11704**: Sistemas Fotovoltaicos - Classificação. Brasília: 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.—. **NBR-14298**: Sistemas Fotovoltaicos – Banco de Baterias – Dimensionamento. Rio de Janeiro, 1999.

BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. 2009. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

BMU (Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear). **Energias Renováveis: eletricidade a partir de fontes de energia renováveis: o que nos custou?** Bonn, 2008.

BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamento e Aplicações**. TCC, Rio de Janeiro, 2008

CANADIAN SOLAR. Datasheet: **CS6U -315/320/335/330P**. Canada: Canadian Solar Inc., 2017

CEPEL; CRESESB; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Revisa e Atualizada. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://cresebs.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em: 12 out. 2017

ECOVOLTS. 2017. Disponível em: <<http://ecovolts.webnode.pt/celulas-fotovoltaicas/constituicao/>>. Acesso em: 06 set. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**: Ano base 2007. Rio de Janeiro: Epe, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2015**: Ano base 2014. Rio de Janeiro: Epe, 2015.

ENELSOLUCOES. 2017. Disponível em: <<https://www.enelsolucoes.com.br/blog/2016/04/tudo-sobre-energia-paineis-solares-filme-fino-e-solar-hibrido/>>. Acesso em: 05 ago. 2017.

ENERGISA. 2017. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

FREIRE, W. P.; **Matemática Financeira**. UFJF Rio de Janeiro, 2009

FRONIUS. 2017. Disponível em: <http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_brasil>. Acesso em: 27 ago. 2017.

GALDINO, Marco A. e et al. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**: Energias Renováveis. 2005. Revista da Direng. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

GHENSEV, A. **Materiais e Processos de Fabricação de Células Fotovoltaicas**. Monógrafia. UFLA, 2006

GOOGLE EARTH, Disponível em: <http://earth.google.com/intl/pt-BR/>. Acesso em: 13 out. 2017.

HELIAR: Baterias Estacionária. 2017. Disponível em: <<https://www.heliar.com.br/pt-br/produtos/estacionaria>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

INTELBRAS. 2017. Disponível em: <<http://www.intelbras.com.br/empresarial/seguranca-eletronica/acessorios/xb-1270>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

LAMARCA JUNIOR, M. R.; **Políticas públicas globais de incentivo ao uso da energia solar para geração de eletricidade**. 2012. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, PUC-SP, São Paulo, 2012.

METEOROPOLE. 2015. Disponível em: <<http://meteoropole.com.br/2012/12/radiacao-na-atmosfera-curso-de-meteorologia-e-saude-parte-1/>>. Acesso em: 13 ago. 2017.

MINHA CASA SOLAR: Controlador de Carga. 2017. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/controlador-de-carga>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

NEOSOLAR: **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes**. 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 22 out. 2017.

NÚCLEO DE TECNOLOGIA EM ENERGIA SOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2017. PUCRS. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/cbsolar/energia.php>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

PHB SOLAR: String Box. String Box. 2017. Disponível em: <http://www.phb.com.br/produtos/solar/StringBox/StringBox_mono_br.aspx>. Acesso em: 18 out. 2017.

PORTALSOLAR. 2017. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 15 out. 2017.

PORTALSOLAR: **A melhor direção do painel fotovoltaico**. 2016. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 09 out. 2017.

PUCINI, E. C.; **Matemática Financeira**. Sistema Universidade Aberta do Brasil. Rio de Janeiro, 2007.

RUTHER, Ricardo et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2017.

RUTHER, Ricardo; SALAMONI, Isabel. **O potencial dos setores urbanos brasileiros para a geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações**. 2011. Disponível em: <<http://www.forumpatrimonio.com.br/print.php?articleID=203&modo=1#>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

SICESSOLAR: Plataforma virtual. 2017. Disponível em: <www.sicessolar.com.br>. Acesso em: 15 nov. 2017.

SOLAR, Portal. Painéis fotovoltaicos. 2017. Disponível em: <<https://pt.solar-energia.net/definicoes/silicio.html>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

SOUZA, Ronilson di. **Baterias: Características Técnicas e Utilização em Sistemas Fotovoltaicos**. São Paulo: Blue Sol, 2017.

SOUZA, Ronilson di. **Células Fotovoltaicas: Tipos e Tecnologias**. São Paulo: Blue Sol, 2017.

SOUZA, Ronilson di. **Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos**. São Paulo: Blue Sol, 2017.

SWERA. 2017. Disponível em: <<https://maps.nrel.gov/swera/#/?aL=z0JMes%5Bv%5D=t&bL=groad&cE=0&IR=0&mC=40.17887331434696,-91.62597656249999&zL=4>>. Acesso em: 20 out. 2017.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. Érica, São Paulo, 2015.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208 p.

APÊNDICE A – Tabela do tempo de retorno de investimento

Ano Índice	kW/Ano/Wp	Energia Gerada (kWh)	Retorno \$	Custos	Fluxo	Somatória
0	1.981,95	173.180,25	R\$ 112.567,17	-R\$ 426.055,61	-R\$ 313.488,44	
1	1.981,95	174.056,67	R\$ 124.450,52	-R\$ 2.258,09	R\$ 122.192,43	-191296,01
2	1.981,95	172.838,28	R\$ 135.937,30	-R\$ 2.393,58	R\$ 133.543,72	-57752,29
3	1.981,95	171.628,41	R\$ 148.484,32	-R\$ 2.537,20	R\$ 145.947,12	88194,83
4	1.981,95	170.427,01	R\$ 162.189,42	-R\$ 2.689,43	R\$ 159.499,99	247694,82
5	1.981,95	169.234,02	R\$ 177.159,50	-R\$ 2.850,79	R\$ 174.308,71	422003,53
6	1.981,95	168.049,38	R\$ 193.511,32	-R\$ 3.021,84	R\$ 190.489,48	612493,02
7	1.981,95	166.873,04	R\$ 211.372,42	-R\$ 3.203,15	R\$ 208.169,27	820662,29
8	1.981,95	165.704,92	R\$ 230.882,09	-R\$ 3.395,34	R\$ 227.486,76	1048149,04
9	1.981,95	164.544,99	R\$ 252.192,51	-R\$ 3.599,06	R\$ 248.593,45	1296742,50
10	1.981,95	163.393,18	R\$ 275.469,88	-R\$ 3.815,00	R\$ 271.654,88	1568397,37
11	1.981,95	162.249,42	R\$ 300.895,75	-R\$ 4.043,90	R\$ 296.851,85	1865249,22
12	1.981,95	161.113,68	R\$ 328.668,43	-R\$ 4.286,54	R\$ 324.381,89	2189631,11
13	1.981,95	159.985,88	R\$ 359.004,52	-R\$ 4.543,73	R\$ 354.460,79	2544091,91
14	1.981,95	158.865,98	R\$ 392.140,64	-R\$ 4.816,35	R\$ 387.324,29	2931416,19
15	1.981,95	157.753,92	R\$ 428.335,22	-R\$ 61.389,40	R\$ 366.945,83	3298362,02
16	1.981,95	156.649,64	R\$ 467.870,56	-R\$ 5.411,66	R\$ 462.458,91	3760820,93
17	1.981,95	155.553,09	R\$ 511.055,02	-R\$ 5.736,35	R\$ 505.318,66	4266139,59
18	1.981,95	154.464,22	R\$ 558.225,40	-R\$ 6.080,54	R\$ 552.144,86	4818284,45
19	1.981,95	153.382,97	R\$ 609.749,60	-R\$ 6.445,37	R\$ 603.304,23	5421588,69
20	1.981,95	152.309,29	R\$ 666.029,49	-R\$ 6.832,09	R\$ 659.197,40	6080786,08
21	1.981,95	151.243,13	R\$ 727.504,01	-R\$ 7.242,02	R\$ 720.261,99	6801048,08
22	1.981,95	150.184,42	R\$ 794.652,63	-R\$ 7.676,54	R\$ 786.976,09	7588024,17
23	1.981,95	149.133,13	R\$ 867.999,07	-R\$ 8.137,13	R\$ 859.861,94	8447886,11
24	1.981,95	148.089,20	R\$ 948.115,38	-R\$ 8.625,36	R\$ 939.490,03	9387376,14