

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – CCAA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

JONYELLE SILVA LIMA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: estudo de viabilidade técnica-financeira de
implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica para o Centro de Ciências Agrárias
e Ambientais – CCAA, na cidade de Chapadinha – MA.

CHAPADINHA – MA

AGOSTO, 2019

JONYELLE SILVA LIMA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: estudo de viabilidade técnica-financeira de implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica para o Centro de Ciências Agrárias e Ambientais – CCAA, na cidade de Chapadinha – MA.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão – UFMA, como requisito obrigatório para a obtenção de título de bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador (a): Prof. Dr. Telmo José Mendes

CHAPADINHA-MA

AGOSTO, 2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Silva Lima, Jonyelle.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA : estudo de viabilidade técnica-financeira de implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica para o Centro de Ciências Agrárias e Ambientais CCAA, na cidade de Chapadinha MA / Jonyelle Silva Lima. - 2019.

86 f.

Orientador(a): Telmo José Mendes.

Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2019.

1. Análise payback. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. , Viabilidade técnica-financeira. I. José Mendes, Telmo. II. Título.

TCC defendido e aprovado, em _____ de _____ de _____, pela Comissão Examinadora constituída pelos professores:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Telmo José Mendes (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Estadual Paulista (FCAV)
Professor Adjunto I da Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Washington da Silva Sousa
Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP)
Professor Adjunto da Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Hudson de Sousa Bastos
Graduação em Ciências Econômicas pela Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Professor da Faculdade do Baixo Parnaíba - FAP

AGRADECIMENTOS

Agradecer em primeiro lugar a Deus, pelas bênçãos e oportunidades que tens me concedido, a minha família, minhas duas irmãs Jamily Silva Lima e Jaiane Silva Lima, pois do início ao fim estiveram comigo nessa longa jornada me dando todo o apoio e estímulo necessário para continuar a diante, pois não é fácil sair de casa em busca de um sonho, ficando longe de familiares e amigos.

Queria agradecer em especial para minha mãe Maria dos Milagres Neto da Silva, foi uma das razões para a realização desse sonho, pois em meio à todas as dificuldades colocadas em seu caminho, nunca me deixou faltar o necessário para continuar, além de ser peça chave insubstituível nessa conquista, obrigado por tudo.

Agradecer aos amigos que aqui eu fiz, pois irei levar para o resto da vida e que me proporcionaram momentos memoráveis e além de conforto quando eu me encontrava longe da família.

Ao professor Dr. Telmo José Mendes, por ter me acolhido como orientando, além de todo o apoio pessoal, profissional e dedicação para a construção desse trabalho.

Agradecer também ao professor Dr. Washington da Silva Sousa, pelo excelente trabalho como coordenador do curso de Engenharia Agrícola, e pela assistência prestadas a todos os alunos do curso dentro das suas atribuições, obrigado.

A todos os meus professores, pois através dos mesmos, cada um contribuindo com suas áreas de estudo, conhecimentos compartilhados e incentivos, foi possível a construção não apenas de um profissional, mas também de uma pessoa melhor, obrigado a todos.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

Com o crescimento populacional, vem também o crescimento por grande demanda energética, esse cenário aumenta-se também a cobrança de impostos no valor tarifário colocado pelas empresas. A energia solar fotovoltaica é uma das principais fontes renováveis de geração de energia elétrica como forma alternativa de redução de gastos com eletricidade e diversificação energética. Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica-financeira de implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica no Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), na cidade de Chapadinha-MA, como alternativa de redução de custos com eletricidade e diversificação energética. O estudo foi realizado através de uma pesquisa exploratória, por meio de estudo de caso, onde através coleta de dados de histórico do consumo energético do CCAA, análise de dados solarimétricos da região, assim como seu potencial de geração de energia elétrica através de energia solar, dados técnicos de equipamentos essenciais para o funcionamento pleno do sistema, assim como o seu dimensionamento para comprovar a viabilidade técnica. Para a análise técnica-financeira como um todo, outros fatores importantes foram necessários nessa análise, ferramentas da contabilidade para a análise de retorno de investimento como, análise payback, e seus principais componentes, VPL, TMA, entre outros. De acordo com os resultados das análises, para a implantação do SFV como forma de reduzir gastos com energia elétrica, promover a diversificação energética do CCAA, com um valor de investimento total de R\$ 1.936.423,22 e levando em consideração a taxa de eficiência do SFV, conclui-se que, o projeto é viável para o período analisado de 25 anos, pois, as condições presentes do ambiente de aplicação, configuração do sistema, a taxa de desempenho e as demais condicionantes, foi possível constatar a viabilidade técnica-financeira de implantação do sistema, e retorno do projeto em 13 anos, 5 meses e 2 dias e ao final desse período, o sistema irá gerar uma economia média anual de R\$ 268.404,69.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Viabilidade técnica-financeira, Análise payback

ABSTRACT

Parallel to population growth, also comes the growth for high energy demand, this scenario also increases the charge of taxes in the tariff value placed by the companies. Photovoltaic solar energy is one of the main renewable sources of electricity generation as an alternative form of reduction of electricity costs and energy diversification. Given this context, the present work had as main objective, analyze the technical and financial viability of generation system deployment photovoltaic power at the center of agrarian and environmental sciences (CCAA), in the city of Chapadinha-MA, as a reduction alternative of electricity costs and energy diversification. The study was conducted through of an exploratory research, through case study, where through data collection, CCAA's energy consumption history, solarimetric data analysis region as well as its power generation potential, through solar energy, equipment technical data essential for the operation full system, as well as its sizing to prove the technical feasibility. For the technical and financial analysis as a whole, other important factors were required in this analysis, accounting tools for return on investment analysis as, payback analysis, and its main components, VPL, TMA, among others. According to the results of the analyzes, for the implementation of SFV as a way to reduce expenses with electric power, promote the energy diversification of the CCAA, with a total investment value of R\$ 1.936.423,22 and taking into consideration the efficiency ratio of SFV, it is concluded that, he project is viable for the 25-year review period, because, the present conditions of the environment of application, system setup, the performance rate, and the other conditions, it was possible to verify the technical-financial viability system deployment, and project return at 13 year, 5 months and 2 days, and at the end of that period, the system will generate an average annual savings of R\$ 268.404,69.

Keywords: Photovoltaic solar energy, Technical and financial viability, Payback Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Órbita da Terra em torno do Sol com eixo N-S inclinado a um ângulo de 23,45°.....	36
Figura 2 - Representação gráfica e imagem de um piranômetro de termopilha.....	39
Figura 3 - Piranômetro e fotodiodo de silício.	40
Figura 4 - Representação gráfica e imagem de um Pirheliômetro.	40
Figura 5 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico isolado (SFI).	43
Figura 6 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR).	43
Figura 7 - Painel solar fotovoltaico monocristalino.	46
Figura 8 - Painel solar fotovoltaico policristalino.	47
Figura 9 - Painel solar de silício amorfo (a-Si).	49
Figura 10 - Painel solar de telureto de cádmio (CdTe).	50
Figura 11 - Localização do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais - CCAA, na cidade de Chapadinha-MA.	53
Figura 12 - Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA).	53
Figura 13 - Atlas Solarimétrico do Maranhão, insolação diária, média anual (horas).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)..	27
Tabela 2 - Unidades para a radiação solar (irradiância e irradiação).	37
Tabela 3 - Especificações das placas m-Si.	46
Tabela 4 - Especificações apresentadas pelo p-Si.	48
Tabela 5 - Especificações apresentadas pelo a-Si.	50
Tabela 6 - Especificações apresentadas pelo CdTe.	51
Tabela 7 - Dados solarimétricos - Mata Roma-MA.	67
Tabela 8 - Dados solarimétricos - Anapurus-MA.	68
Tabela 9 - Dados solarimétricos - São Benedito do Rio Preto-MA	69
Tabela 10 - Dados solarimétricos - Vargem Grande-MA.	70
Tabela 11 - Dados solarimétricos - Chapadinha-MA.	71
Tabela 12 - Especificações técnicas do painel solar fotovoltaico YL330P-35b (330Wp).	76
Tabela 13 - Especificações técnicas do inversor de carga Fronius Symo 17.5-3-M.	77
Tabela 14 - Previsão de orçamento do projeto.	81
Tabela 15 - Cálculo de energia produzida em cada mês pelo sistema fotovoltaico ao longo do ano...	82
Tabela 16 - Fluxo de caixa projetado.	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz elétrica brasileira.	26
Gráfico 2 - Potencial eólica contratado (MW).	30
Gráfico 3 - Dados solarimétricos - Mata Roma-MA.	68
Gráfico 4 - Dados solarimétricos - Anapurus-MA.	69
Gráfico 5 - Dados solarimétricos - São Benedito do Rio Preto-MA.	70
Gráfico 6 - Dados solarimétricos - Vargem Grande-MA.	71
Gráfico 7 - Dados solarimétricos - Chapadinha-MA.	72
Gráfico 8 - Histórico de consumo - Centro de Ciências Agrárias e Ambientas (CCAA).	74

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Determinação da potência de pico do módulo FV (PP_{MFV}).	59
Equação 2: Dimensionamento da quantidade de módulos FV (N_p) do sistema.	59
Equação 3: Fator de dimensionamento de inversore de carga (FDI).	61
Equação 4: Tensão de entrada do inversor de carga.	61
Equação 5: Faixa de tensão de operação do SPPM do inversor de carga.	61
Equação 6: Corrente máxima c.c. do inversor de carga.	62
Equação 7: Dimensionamento da seção de cabeamento.	63
Equação 8: Relação entre corrente de curto circuito das séries em paralelos, corrente nominal do fusível e corrente reversa suportada pelo sistema.	64
Equação 9: Relação de entre corrente máxima no circuito, número de séries ligados e corrente de curto circuito.	64
Equação 10: Cálculo do payback simples (PPs).	65
Equação 11: Cálculo do payback descontado (PB_D).	65
Equação 12: Cálculo do valor presente líquido (VPL).	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Histórico da energia elétrica	19
2.2 Principais tipos de uso e dependência da energia elétrica	23
2.3 Principais meios de produção de energia elétrica	25
2.3.1 Matriz elétrica brasileira	25
2.3.2 Hidráulica	28
2.3.3 Eólica	29
2.3.4 Geotérmica	31
2.3.5 Nuclear	32
2.3.6 Biomassa	33
2.3.7 Solar	34
2.3.7.1 <i>Princípios da radiação solar</i>	35
2.3.7.2 <i>Dispositivos para medição da irradiação solar</i>	37
2.4 Geração de energia solar fotovoltaica	41
2.4.1 Princípios de funcionamento das células fotovoltaicas	43
2.4.1.1 <i>Silício cristalino(c-Si)</i>	44
2.4.1.2 <i>Silício amorfo (a-Si)</i>	48
2.4.1.3 <i>Telureto de cádmio (CdTe)</i>	50
3 METODOLOGIA	52
3.1 Descrição do Local de Estudo	52
3.2 Levantamento de dados solarimétricos da região em estudo	54
3.2.1 Localização e tipo de configuração do SFV	56
3.2.2 Demanda e consumo elétrico.....	58
3.2.3 Dimensionamento do gerador FV	58
3.2.4 Dimensionamento da quantidade de módulos FV	59
3.2.5 Dimensionamento do inversor de carga de c.c em c.a.....	59
3.2.6 Dimensionamento das instalações elétricas para corrente contínua (c.c) e corrente alternada (c.a)	62
3.2.7 Dimensionamento dos dispositivos de segurança.....	63
3.3 Indicadores de análise de viabilidade econômico-financeiro e retorno de investimento	64
3.3.1 Payback simples	65
3.3.2 Payback descontado.....	65
3.3.3 Valor presente líquido (VLP)	66

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 Levantamento dos dados solarimétricos	67
4.2 Localização e tipo de configuração do sistema	72
4.2 Demanda e consumo elétrico do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA)	73
4.3 Dimensionamento do gerador FV	75
4.4 Dimensionamento da quantidade de módulos FVs	75
4.5 Dimensionamento do inversor de carga c.c em c.a	76
4.6 Dimensionamento das instalações elétricas para o SFV de c.c e para c.a	79
4.7 Dimensionamento dos dispositivos de segurança.	80
4.8 Previsão de orçamento do projeto	81
4.9 Análise de retorno de investimento	81
5 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional vem também o crescimento por grande demanda energética, a exploração intensa e desordenada dos combustíveis fósseis já causou e continua causando sérios danos ao meio ambiente e apresenta um cenário cada vez mais alarmante para as próximas gerações. Nesse contexto, cada vez mais vem se buscando fontes de energias limpas e renováveis, pois além de ajudar a suprir a demanda energética também não agridem tanto o ecossistema do planeta, contribuindo assim para uma melhor qualidade de vida (LODI, 2011).

Diante do cenário atual, a preocupação ambiental é crescente, na maioria dos países. Por consequência disso, as fontes de energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado mundial (JARDIM, 2007).

Ainda segundo Lodi (2011), os principais motivos para o aumento na participação de energias renováveis, são as preocupações ambientais, desenvolvimento social e econômico, o aumento da competitividade diante da geração convencional, a inconstância nos preços dos combustíveis fósseis, aumento na demanda energética, a segurança energética e as políticas governamentais.

A geração de energia elétrica no Brasil tanto em centrais de serviços públicos como para os próprios autoprodutores atingiu cerca de 588,00 TWh em 2017, resultado de 1,60% a mais em relação ao ano de 2016 destaca a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018), empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia.

Segundo dados do balanço energético nacional publicado em 2018 tendo como ano base 2017, realizado pelo EPE, as centrais elétricas de fornecimento público, tiveram uma participação de 83,40% na geração total de energia no país. Conforme o balanço, a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil, teve uma redução de 2,46% na sua participação em comparação com o ano anterior (EPE, 2018).

Ainda segundo o balanço energético, energias provindas de fontes não renováveis têm uma participação de 20,8% no total produzido no país em 2017, contra 19,60% no ano de 2016. Já a energia produzida por autoprodutores (APE) teve uma participação de 16,50% do total produzido no ano base de 2017, tendo assim um total de 96,80 TWh que é referente a soma de todas as fontes utilizadas, e apenas 41,40TWh desse total foi injetado de fato na rede, constatando assim que 55,40TWh fora produzido e consumida pelas próprias unidades geradoras como siderúrgicas, setores de papel e celulose, açúcar e álcool, indústria química, entre outras empresas do setor energético.

Ainda segundo dados do EPE (2018), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hidráulica que responde por 65,20% da oferta interna, 10,50% do gás natural, 8,50 biomassa, 6,77 da energia eólica, 4,20% carvão, energia nuclear e derivados do petróleo, ambas com oferta interna de 2,50%, e energia solar, que apesar de cada dia mais ganhar espaço dentre as fontes alternativas de produção de energia, ainda representa apenas 0,13% da oferta interna de energia.

As fontes de energias renováveis representam em torno de 80,40% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2018).

Com o atual panorama que o Brasil vem apresentando ao longo dos últimos anos em relação as crises financeiras, que por sua vez é ainda mais intensificada pela crise política refletindo diretamente no aumento da cobrança no valor de itens básicos ao desenvolvimento humano e social como água, alimentos em geral, eletricidade, combustíveis, entre outros. Em consequência disso, é cada vez maior a busca por novas técnicas e tecnologias que diminuam os gastos com esses itens básicos, não apenas com água ou alimentos em geral, mas também, principalmente com geração de energia elétrica é um fator fundamental para o desenvolvimento da sociedade nos dias de hoje (SILVA JUNIOR, 2017).

Essenciais não apenas em residências ou mesmo no setor comercial, na indústria, mas também em instituições de ensino, seja escolas, universidades ou centros de pesquisas, em fazendas, hospitais, transportes e nas mais diversas aplicações onde se requer o uso de eletricidade.

Diante desse contexto, é de crucial importância a busca por novas fontes alternativas de geração de energia elétrica, que possam ser usadas como forma de suprir essa demanda energética. Assim, é possível ainda diminuir os custos operacionais das instituições de ensino com relação a energia elétrica, pois a cada dia a demanda energética destas instituições aumentam, seja por motivos de expansão e adesão a novos cursos, equipamentos para laboratório que por vezes ficam semanas ou até meses ligados para obtenção de resultados de pesquisas, iluminação, refrigeração de ambientes, uso em recursos didáticos, entre outros, e que de certa forma geram um consumo considerável de eletricidade, que reflete diretamente no valor pago por essas instituições às concessionárias que fornecem energia elétrica.

Entretanto, as fontes de energias alternativas que possam substituir em seu todo ou em partes essas concessionárias, ainda são tecnologias recentes, e por isso precisam ser confirmadas a sua eficiência energética do ponto de vista técnico, além da sua viabilidade econômica de implantação de um sistema de abastecimento de energia, sempre com o objetivo de deixar mais barato sua aquisição e utilização, visando assim uma boa economia nos gastos com eletricidade.

Hoje em dia é possível encontrar no mercado diversa gama de informações sobre fontes alternativas de energias além de informações e dados sobre sua disponibilidade nas mais diversas regiões do país e do mundo, informações essas que são de fundamental importância para que a implantação da mesma seja viável do ponto de vista técnico e financeiro.

Portanto, pelas características geográficas do Brasil, especialmente no estado do Maranhão, a fonte de energia alternativa que se destaca é a energia solar. Dentre as técnicas de energia solar, significativamente, a fotovoltaica foi a escolhida para este estudo, uma vez que, dentro das tecnologias inovadoras ela vem se estabelecendo no mercado pela flexibilidade de instalação nos mais diversos locais do globo terrestre (SILVA JUNIOR, 2017).

No entanto, a presente pesquisa, se apoia em um estudo de viabilidade técnica-financeira que implicará na decisão de implantação ou não de um sistema de geração de energia fotovoltaica para instituição de ensino superior pública, para as condições geográficas e ambientais da cidade de Chapadinha-MA, e assim poder suprir lacunas sobre estudos que possam viabilizar a implantação de fontes alternativas de geração de energia não só em unidades de ensino, mas também em diversas outras aplicações na região.

Por conseguinte, o presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica-financeira de implantação do sistema de geração de energia fotovoltaica em instituição de ensino superior, como forma de reduzir gastos como energia elétrica e promover a diversificação da geração de eletricidade do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, serão abordados os temas de forma técnico que irão dar fundamentação conceitual da problemática do presente trabalho, além de falar um pouco sobre uma visão geral da história da eletricidade, abordando aspectos e descobertas importantes envolvendo a eletricidade ao longo da história. Assim como seu uso e dependência para o desenvolvimento humano, as principais formas de geração de energia elétrica, a composição da matriz energética brasileira, será abordado também como se dá a produção de energia fotovoltaica, principais meios de medição de irradiação solar assim como seu princípio de funcionamento, além de aspectos importantes regulamentados na Resolução Normativa nº 488 da ANEEL.

2.1 Histórico da energia elétrica

Sendo considerada uma das mais importantes descobertas já feita pelo homem, a eletricidade ganhou destaque revolucionário em todo o mundo, pois devido a sua grande gama de aplicação ajudou a humanidade a se desenvolver de forma cada vez mais acelerada, facilitando assim cada vez mais a vida do homem. A energia elétrica sempre existiu na natureza nas mais variadas formas, em fenômenos naturais como os raios ou menos em certos animais que continham certos aspectos singulares que lhes permitia abrigar de forma natural esse poder. Essa característica ímpar existente na natureza era vista pelos povos antigos com grande fascínio, pois desconheciam suas origens naturais, e só então através do filósofo e matemático da Grécia antiga, Thales de Mileto (634 a.C a 548 a.C) que os primeiros estudos e experimentos do fenômeno da eletricidade estática foram registrados, com o intuito de poderem usar em benefício da humanidade. A partir de então, que surgira a terminologia eletricidade, que vinda do grego “elektron” para denominar o âmbar, mais tarde do latim viria a ser chamada de “electricus” (FERREIRA, 2001).

A primeira observação desse efeito foi através do âmbar, material resultado do endurecimento de resina de árvore extinta há milhões de anos (SAMPAIO, 2005), usada na fabricação de vários tipos de objetos no século VI.a.C, Thales percebeu que ao atritar esse material com lã ou pele de animais, o mesmo adquiria a capacidade de atrair objetos leves como, fios de algodão, cabelos ou pedaços de palha.

Outros objetos também foram encontrados por filósofos e matemáticos gregos, os mesmos possuíam características semelhantes ao âmbar, pois ao serem friccionados também ficavam eletricamente carregados e podia atrair outros objetos leves (FERREIRA, 2001).

Outra observação importante sobre esses objetos diz respeito ao comportamento das pedras encontradas na antiga região grega chamada Magnésia que hoje pertence à Turquia. Essas pedras possuíam a propriedade de atrair objetos de ferro, pois são constituídas de uma substância que hoje é conhecida como “magnetita”, um óxido de ferro (Fe_3O_4) que mais tarde receberia o nome de ímã (SAMPAIO, 2005).

Os estudos sobre as propriedades magnéticas do âmbar e da magnetita só começaram a progredir com o trabalho do médico e cientista inglês William Gilbert (1544-1603). Em 1600 ele publicou o livro “De Magnete”, no qual relatava o resultado de suas pesquisas. Como sugere o título, o assunto principal da obra é o estudo dos magnetos, embora o autor também relate estudos sobre o âmbar (SAMPAIO, 2005), além disso, seu trabalho e a publicação da obra voltada exclusivamente às proezas da eletricidade e eletromagnetismo, com o título “De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de magno Magnete Tellure”. A obra contemplava a inclusão de novos materiais que se assemelhavam ao âmbar, como, o vidro, lacre e enxofre (FERREIRA, 2001).

Em meados do século XVII e XIX surgiram novos estudos mais peculiares sobre a energia elétrica que segundo os cientistas era considerado um verdadeiro marco na descoberta científica, pois através dessas novas descobertas obtiveram o pontapé inicial para a utilização de utensílios em benefício da sociedade (BOSS, 2007).

Em meados de 1729, o físico e astrônomo conhecido como Stephen Gray descobria através de suas experiências casuais que certos materiais presentes na natureza teriam a característica de conduzir a eletricidade, porém outros teriam características opostas, ou seja, poderiam ser isolantes. Stephen Gray ainda vai mais além quando começa a discutir sobre o princípio de indução eletrostática, através de carregar um objeto em um campo elétrico de outro corpo já carregado. De forma conceitual e mais técnica, o processo de indução elétrica consiste sempre que um corpo carregado eletricamente distribua suas cargas para com um condutor neutro, para isso o corpo eletrizado faz a redistribuição de sua carga nas proximidades do corpo neutro, permitindo serem atraídos e repelidos, fazendo assim atuar a conhecida hoje como Lei da Atração e Repulsão das cargas elétricas (BOSS, 2007).

Anos mais tarde, acerca de 1733 que a Lei da Atração e Repulsão fora criada, a essa façanha foi atribuído a dois pesquisadores, Jean-Antoine Nollet e Charles François de Cisternay Du, que através de seus estudos e experimentos sobre os fenômenos da eletricidade observaram um objeto ao ser eletrizado, observou-se diferenciação nas suas reações, pois em alguns momentos, ao se eletrizar alguns objetos ora eles se atraíam e em determinados momentos eles

se repeliam, confirmando assim através de seus experimentos a existência dois tipos de carga elétrica, uma positiva e a outra negativa (BENJAMIN, 1898).

Outra importante descoberta envolvendo o fenômeno da eletricidade foi através de experiências com energia eletrostática, realizadas pelo alemão Ewald Gerog von Kleist em 1745, onde constatou a possibilidade de seu armazenamento. O experimento que constatou essa capacidade de armazenamento da eletricidade estática era baseado na ligação da um gerador de alta tensão eletrostática, onde o mesmo era ligado a uma jarra com água onde uma das mãos do cientista funcionava como barramento condutor e a jarra como um isolante elétrico. Depois de algum tempo, o gerador eletrostático era retirado, e com a mão tocava a haste de fio condutor percebia que recebia pequenas cargas elétricas em sua mão, constatando assim que a eletricidade estática poderia ser armazenada. Essa grande descoberta foi de extrema importância, pois a partir de então, abriu-se as portas para outros estudos envolvendo a eletricidade e suas possíveis aplicações (BENJAMIN, 1898).

Em meados de 1800 foi desenvolvida a primeira pilha, sendo classificada de pilha voltaica, pois seu experimento para confirmar através da utilização de diferentes metais como discos de cobre e de zinco, empilhados de forma alternados e separados por tecido úmido por uma solução de ácido sulfúrico, gerando assim carga elétrica num fio condutor quando interligado suas extremidades (BENJAMIN, 1898).

Entre os anos de 1826 a 1827, surgiu outra importante descoberta científica no ramo da eletricidade, o físico e matemático alemão Georg Simon Ohm desenvolveu a primeira equação de condução elétrica em circuitos. Pois através do princípio da condução de calor de Fourier, fabricou diversos fios de comprimento e espessuras diferentes com o intuito de calcular a condução elétrica. Mediante isso, também foi estabelecido o conceito de resistência elétrica, condicionada pelo elevado número de elétrons livres que irá passar por um condutor e nesse momento os elétrons irão colidir entre si e com os átomos do metal condutor, havendo assim uma dificuldade dos elétrons no deslocamento, surgindo assim o conceito de resistência elétrica ou como é mais conhecida a Lei de Ohm (ASSIS, 2009).

Em 1930 houve a descoberta de um novo fenômeno no ramo da eletricidade denominado de Indução Eletromagnética pelo físico e químico inglês Michael Faraday. Esse fenômeno é o de uma força eletromotriz e tensão exposto a um campo magnético variável ou no campo magnético estático (ASSIS, 2009).

Faraday, logo depois da descoberta do fenômeno de indução eletromagnética, enfatizou para a necessidade na alteração no campo eletromagnético com o intuito de criar

corrente elétrica, pois através da variação da intensidade da corrente elétrica em um circuito fechado, poderia induzir uma nova corrente em uma bobina (cilindro de fios condutores, cabos enrolado sobre um tubo de cartão ou outro material) paralela. Outra grande descoberta casual desses experimentos foi que, ao aproximar um ímã de uma bobina, surgem então uma corrente induzida, mostrando assim que a corrente elétrica pode ser controlada e direcionada.

Michael Faraday, um dos cientistas mais renomados dentro dos estudos sobre a eletricidade, foi um grande precursor de estudos posteriores sobre a eletricidade, principalmente para o francês Hippolye Pixii que em 1832 criou o primeiro gerador de corrente alternada (c.a) e era composto por um dínamo de magneto e que o mesmo gerava mediante a uma manivela com seus polos passando sobre uma bobina de ferro, gerando então um pulso eletromagnético que por sua vez gerava c.a (ASSIS, 2009).

Em 1860, 28 anos depois da criação do primeiro gerador de c.a, foi desenvolvido o primeiro dínamo gerador de corrente contínua (c.c), constituído de um anel com enrolamento fechado. Já em 1869 um engenheiro belga Zénob Gramme desenvolveu um dínamo capaz de converter energia mecânica em energia elétrica, portanto, gerando tensão contínua e superior a todos os outros desenvolvidos até então. Gramme ainda enfatiza que se o dínamo for ligado a uma c.c, o mesmo poderia funcionar como um motor, e sendo assim, surgiu o primeiro motor elétrico, um dos grandes inventos da época e que teve bastante aplicabilidade na indústria (BOSS, 2007).

No entanto, a c.c apesar de gerar grandes quantidades de eletricidade também possuía algumas limitações, especialmente na sua distribuição, ou seja, tinha um limite de distância do ponto de geração que era de dois quilômetros, exigindo assim para a sua distribuição à longas distâncias a construção de novos geradores, além da possibilidade de derretimento dos fio por aquecimento (efeito Joule). Mas com a invenção da c.a, foi possível sanar esse problema, pois seu princípio de funcionamento consistia em uma mudança de polaridade ou sentido da corrente em períodos bem definidos de forma que a corrente circula ora num sentido, ora em outro. Com a c.a, houve uma maior eficiência e economia (FERREIRA, 2001).

Depois de sanado o problema da c.c através da criação da c.a, possibilitando assim a distribuição de eletricidade por maiores distâncias, em 1882, no rio Fox situado em Appleton, estado de Wisconsin nos Estados Unidos, foi criada a primeira usina hidrelétrica para geração de energia, logo depois, em 1883, o engenheiro eletricitista Nikola Tesla, inventou a bobina de tesla, um transformador que era capaz de converter eletricidade de baixa tensão em alta tensão.

Com esse feito, Nikola Tesla possibilitou o transporte de energia elétrica para distâncias cada vez mais elevadas, além disso, através de outra invenção sua o alternador elétrico que possuía a finalidade de criar corrente alternada a partir de corrente contínua, que era mais comum na época. No mesmo ano, foi criada pelo inventor Charles Parsons a primeira turbina a vapor, apesar do invento ter sido considerado simples, houve uma grande demanda do produto, principalmente para navios, além disso, a turbina ao ser ligada a um dínamo, criava cerca de 7,5 kW de eletricidade, produzindo mais energia, menos desperdício que os inventos até então desenvolvidos (FERREIRA, 2001).

Por tanto, como observado, a eletricidade passou por diversos processos de descoberta até o seu entendimento de funcionamento propriamente dito, partindo de estudos, curiosidades, experimentos realizados de forma mais rudimentares e até mesmo descobertas acidentais, que de forma lenta, e gradativa ao longo do seu desenvolvimento na história, sempre teve grande importância para o desenvolvimento humano, industrial e econômico para que hoje em dia o modo de vida da sociedade pudesse ser mais facilitado através do surgimento de novas tecnologias que proporcionassem essa condição.

2.2 Principais tipos de uso e dependência da energia elétrica.

No modo de vida da sociedade contemporânea o uso da eletricidade é fator indispensável para a sua sobrevivência e desenvolvimento. Os métodos de aperfeiçoamento, juntamente com o desenvolvimento de novas formas de geração e aproveitamento dessa energia, são frutos de uma longa caminhada no decorrer do tempo, desde de sua descoberta até o seu domínio e aplicação no cotidiano das pessoas.

Nesse contexto, paralelo ao crescimento populacional, é possível notar um aumento na demanda energética em face da sua grande dependência. Os principais setores responsáveis pelo desenvolvimento humano como a agricultura, indústria, medicina, economia, transporte, infraestrutura, dentre outros, demandam cada vez mais por energias que possam suprir suas necessidades.

Porém, a demanda de energia e sua forma de utilização e produção, está intimamente relacionada a diversos fatores técnicos, sociais, econômicos, geográficos e ambientais. Fatores estes que são de extrema importância para uma produção de energia de qualidade e com quantidade suficiente para suprir a demanda dos meios de produção e da sociedade como um todo.

Segundo Silva Filho (2003), um dos principais indicadores do seu nível energético é o seu desenvolvimento econômico, fator esse segundo o autor, pode ser facilmente perceptível

quando comparado a países desenvolvidos e subdesenvolvidos, pois é notório a diferença no consumo de países rico em comparação com países pobres. De forma mais simples e ilustrativa, é interessante analisar a relação entre a economia e o consumo de um país respectivamente. Países ricos apresentarem um desenvolvimento econômico mais elevado, onde o mesmo reflete no poder energético de suprir a demanda de seus habitantes, em face contraria, estão os países pobres, o mesmos sofrem certas dificuldades em atender a demanda energética de seus habitantes, seja por falta de recursos tecnológico, localização geográfica ou pelo principal fator destacado pelo autor que o poder econômico.

A energia elétrica e suas diversas formas de aplicação e utilização de forma geral, abriu muitas portas para permitir o desenvolvimento humano, pois hoje a eletricidade é fator vilta para humanidade sendo empregadas nos mais diversos setores como inicialmente no setor de comunicações, na indústria química, metalúrgica, transportes, agricultura e nos mais diversos setores importantes para o desenvolvimento social.

Fatore esses condicionaram grandes melhorias para a humanidade como, a qualidade de vida, no desenvolvimento de equipamentos que facilitam o cotidiano, permitiu avanços na medicina, aperfeiçoamento e ampliação dos meios de produção de alimentos e até mesmo no próprio desenvolvimento de tecnologia inovadoras para melhorar a eficiência de produção, distribuição e consumo no setor de energia elétrica (SILVA JUNIOR, 2017).

De acordo com muitos pesquisadores e estudiosos, através de surgimento e domínio da eletricidade, houve o que eles chamam de uma nova “ordem mundial”, pois através da energia elétrica a humanidade tomou novo rumo, transformou e levou o homem muito além do que se podia perceber, além de transformações em grandes setores cruciais, como a indústria, economia, saúde, produção agrícola, desenvolvimento social e tecnológico, desenvolvimentos esses que foram possíveis apenas através das maravilhas condicionadas pela eletricidade (HOBSBAWN, 1969).

Desse modo é possível notar grandes mudanças no modo de vida da humanidade através das aplicações da eletricidade, transformou a forma de vida de forma mais arcaica à um grande e complexo sistema de diferentes culturas, meio de produção, lazer, trabalho, facilitadas e constantemente em evolução para que necessidades sejam supridas, melhores qualidades de vida sejam criados e melhores interações e relações entre diferentes culturas em prol de um desenvolvimento mais justo e sustentável.

2.3 Principais meios de produção de energia elétrica

De forma geral, para que um país tenha fontes de geração de energia capazes de suprir sua demanda energética, alguns fatores e condições devem ser atendidas, como características técnicas e ambientais, recursos naturais, posicionamento geográfico, viabilidade técnica-financeira. Pois quanto maior a quantidade de condicionantes para diferentes formas de geração de energia elétrica, maior o potencial de diversificação da matriz energética de cada país. Pois o intuito principal de se diversificar uma matriz energética de um país é simplesmente para os seus usuários não fiquem condicionados e dependentes de apenas uma fonte de geração de energia, sendo que a natureza tem suas mudanças sazonais além de falhas de fornecimento podem ocorrer, diante disso, dentro das condições preestabelecidas anteriormente, o ideal é que se possa empoderar mais de uma fonte geradora (NOVAES, 2009).

Em detrimento de haver cada vez mais demanda energética, novas formas vão de geração e ou transformação de energia vão sendo inventadas e readaptadas para suprir as necessidades presentes, pois essa é uma das características do homem, se adaptar ao longo do tempo para a sua sobrevivência, fato esse que pode ser observado como a adaptação e evolução através da história, principalmente com o fogo, pecuária, domesticação de animais, agricultura e eletricidade (NOVAES, 2009).

Por conseguinte, as fontes de geração de energia de cada região, dependerá dos fatores condicionantes da mesma, pois cada região do globo terrestre apresenta potencial particular de uma ou mais fontes de geração de energia de acordo com suas características físicas, geográficas e técnico-financeiro. Portanto, de forma sistemática serão apresentadas algumas das formas de geração de energia no qual o Brasil tem um grande potencial, como energia hidráulica, eólica, geotérmica, nuclear, biomassa, além de abordar de forma mais detalhada a geração de energia solar que é o foco de estudo do presente trabalho.

2.3.1 Matriz elétrica brasileira

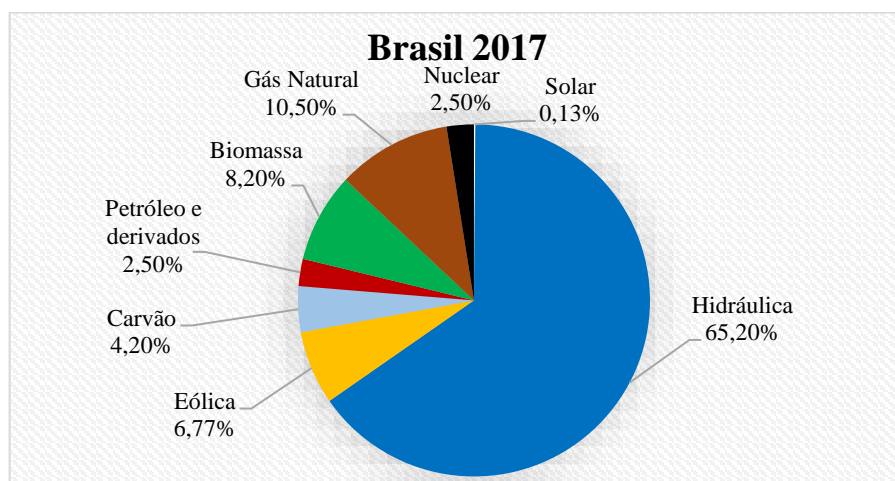
Segundo Brasil (2010), o século XX marcou o Brasil por um grande declínio no desenvolvimento econômico ocasionado por um grande aumento na demanda por energia elétrica, energia essa muito importante para os principais setores responsáveis pelo desenvolvimento do país. Esse aumento na demanda por eletricidade é consequência do constante crescimento populacional o que por sua vez demanda de um maior consumo de produtos para suprir suas necessidades básicas, o que requer ainda mais energia pelos setores responsáveis por produzi-las.

Logo a pós a segunda guerra mundial (1939-1945), o Brasil começou um desenvolvimento, aprimorando a energia em prol da melhoria e desenvolvimento da sociedade, principalmente pelo início da construção de uma infraestrutura para a implantação de fábricas e indústrias na sua grande maioria estrangeiras que marcaria o início de um grande processo de desenvolvimento nacional (BRASIL, 2010).

Em meados da década de 70, o Brasil era provido de apenas duas fontes de energia formando assim a matriz energética brasileira que apenas no ano de 2000 começou a incluir a hidroelétrica como outra fonte de energia. Tanto com aumento populacional como o início do desenvolvimento da indústria, demandavam por uma maior quantidade de energia. Diante disso, o investimento começou a ser mais acentuado no que hoje domina a matriz energética do país, a hidroelétrica, por ser mais econômica em relação à outras fontes de geração de energia, o país com condições muito favoráveis e grande potencial, havendo também a necessidade de exploração de outras fontes de energia segundo o Ministério de Minas e Energia na sua projeção para 2030. Segundo essa projeção, até 2030, o Brasil irá precisar de pelo menos quatro fontes de energia para poder suprir sua demanda interna de consumo, sendo que algumas deverão ser substituídas de maneira gradativa como é o caso da madeira e além de outras (BRASIL, 2010).

Sabendo-se que no Brasil houve uma grande necessidade de se buscar novas fontes de energia capazes de suprir sua necessidade energética, o Balanço Energético Nacional (BEN), realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), retrata como é composta a matriz elétrica Brasileira (BEM, 2018).

Gráfico 1 - Matriz elétrica brasileira.



Fonte: adaptado, BEN (2018).

Segundo os dados da matriz elétrica brasileira, é importante destacar dois fatores. O primeiro é a respeito da grande representatividade da energia hídrica e o quão dependente dela o

país é, pois o mesmo ainda não teria um plano alternativo para suprir a demanda energética em um possível caso de parada do seu fornecimento por motivos de falha. O segundo diz respeito a baixa representatividade da energia solar na matriz energética brasileira, a qual é o foco desse trabalho. Entretanto, segundo Brasil (2010), depois de ser vigorada a Regulamentação Normativa da ANEEL N°482 em 2012, a qual a mesma trata sobre condições e incentivos para a microgeração e minigeração distribuídas de energia elétrica foi possível observar um aumento da utilização desse tipo de energia como mostra a tabela 1 a seguir.

Tabela 1- Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh).

Fonte	2015	2016	Δ 16/15
Hidroelétrica	359.743,00	380.911,00	5,90%
Gás Natural	79.490,00	56.485,00	-28,90%
Biomassa	47.394,00	49.236,00	3,90%
Derivados do Petróleo	25.657,00	12.103,00	-52,80%
Nuclear	14.734,00	15.864,00	7,70%
Carvão Vapor	18.856,00	17.001,00	-9,80%
Eólica	21.626,00	33.489,00	54,90%
Solar Fotovoltaica	59,00	85,00	44,70%
Outras	13.669,00	13.723,00	0,40%
Geração total	581.228,00	578.898,00	-0,40%

Fonte: Adaptado, Brasil (2017).

A Resolução Normativa da ANEEL N° 482, tem uma importante função fundamental que é incentivar, fundamentar e fortalecer a propagação da necessidade de novas fontes de energia no Brasil partindo da ideia de que a matriz energética precisa ser mais diversificada, além de estabelecer as condições de forma geral para a sua aquisição, pois são fatores muito importantes em um país com grande potencial e recursos naturais que proporcionam essa diversificação, muito embora esteja em constantes crescimento, tanto populacional como industrial, tecnológica e contribuiu de forma tão significativa que refletiu diretamente no interesse de instituições econômica para a abertura de linha de crédito para financiamento e investimento em fontes alternativas de geração de energia elétrica como é o caso do Banco do Nordeste que tem o programa de Financiamento para Energia Solar (FNE Sol), que trata especificamente para financiamento de energia solar, onde o mesmo oferece boas

condições para a obtenção de crédito para a compra a instalação do sistema de geração de energia fotovoltaica desde que o estabelecimento onde o sistema será instalado esteja situado na região nordestina do país (ANEEL, 2012; BANCO DO NORDESTE – BNB, 2016).

Por fim, essas instituições financeiras proporcionam condições favoráveis para esse tipo de investimento além da perspectiva de aumento de investidores e do governo federal, além de redução de impostos que fortalecerão ainda mais o seguimento para a geração de energia limpa e garantindo o suprimento da demanda energética nacional. O custo inicial pode ser zero, pois o projeto é dimensionado de forma a não ultrapassar o valor pago para as concessionárias que fornecem energia e ainda tem uma carência de que se inicie o pagamento que geralmente é de um ano (BANCO DO NORDESTE - BNB, 2016; IPESI, 2015).

Por fim, baseado nesse contexto, abre-se a possibilidade para pessoas tanto físicas como jurídicas investirem em novas fontes de energia, por possuírem financiamento mais acessível e taxa de juros mais baixos.

2.3.2 Hidráulica

A energia hidráulica pode ser definida tendo como sua forma de geração provinda do aproveitamento da força da água dos rios, e tendo como principal meio de transformação as hidroelétricas, onde a força das águas fazem mover grandes turbinas através da sua energia potencial em energia mecânica e então logo em seguida é transformada em energia elétrica (EPE, 2018).

Alguns fatores são muito importantes para o princípio de funcionamento de uma usina hidroelétrica, principalmente no que diz respeito aos aspectos técnicos, como por exemplo a localização, topografia, dimensão do reservatório, altura da queda d'água, vazão, potência, tipo de turbina, entre outros. Aspectos esses que juntos irão dizer quanto de energia será produzido em relação ao que será consumida para sua criação, demonstrando assim a sua eficiência energética (FARIAS, 2017).

No entanto, essa fonte potencial de geração de energia elétrica varia ao longo do ano dependendo muito das condições climáticas, principalmente da chuva, pois é através da água da chuva que irá elevar o nível dos rios e assim fazer girar as turbinas para a geração de energia elétrica. Para uma melhor eficiência no processo de geração de energia elétrica é importante que o sistema funcione de forma correta, pois também é sempre importante a conservação ambiental da bacia (EPE, 2018).

Como foi citado anteriormente, as hidroelétricas apesar de serem uma das maiores fontes de geração de energia elétrica do país atualmente, também sofre quando os níveis de

água dos rios estão baixos, pois diminui sua energia potencial para movimentar as turbinas comprometendo seu máximo desempenho. Para resolver o problema de baixas no volume dos rios que prejudica a produção de energia ao longo do ano, algumas usinas constroem reservatórios para acumulação da água e manutenção de um nível adequados à produção de energia de forma mais eficiente. Também ajuda em outros aspectos da sociedade como abastecimento de águas nas cidades, irrigação para a produção de alimentos entre outros (EPE, 2018).

Na construção de uma barragem para uma hidroelétrica, além de diminuir os entraves no fluxo de produção de energia, também causam alguns impactos ao meio ambiente. Pois, prejudica o ecossistema aquático, dificultando a reprodução de espécies aquáticas e terrestre dependentes daquele habitat, uma solução para esse problema seria a construção de passagens artificiais para que as espécies possam se reproduzir e fazer a manutenção ecológica do ecossistema, mas para que se possa determinar o tamanho desses impactos, é importante que se faça previamente, antes da construção da barragem, um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para além de mensura-los, traçar planos para diminuir seus efeito.

Segundo GRANZA (2010), para um país com características favoráveis à produção de energia elétrica o mesmo possui grande capacidade de se abastecer energeticamente gastando muito pouco, garantido além do fornecimento interno de energia elétrica, também acaba por desenvolver todos os setores da sociedade, principalmente o econômico.

2.3.3 Eólica

A energia eólica foi inicialmente usada pela humanidade para outros fins e não para a geração de energia elétrica propriamente dita, pois esta foi uma aplicação mais contemporânea. Pois através da força do deslocamento do ar (vento) usada em barcos para impulsionar suas viagens, para o bombeamento de água através dos moinhos de vento fora de grande utilidade para o desenvolvimento da sociedade (MOLINARI, 2009).

A energia eólica é obtida através do aproveitamento do movimento da massa de ar (vento), pois é proveniente da radiação solar que aquece a terra e por sua superfície ser de forma não uniforme, faz surgir reações dos ventos que é uma mudança de densidade no ar quente, onde o mesmo por ser mais leve que o ar frio, se desloca para parte mais alta da atmosfera fazendo assim um deslocamento da massa de ar, dentre os outros fatores (MOLINARI, 2009).

Para a geração de energia elétrica são usados aerogeradores constituídos de grandes hélices que ao captar esse deslocamento da massa de ar, girando-a em um movimento circular em torno de um eixo central, convertendo assim energia mecânica em energia elétrica. As

hélices possuem geralmente tamanhos em torno de 150,00 metros de altura e são instaladas em estruturas de fixação vertical, as chamadas torres eólicas. A energia provinda de usinas eólicas é considerada como energia renovável, pois não polui o meio ambiente em seu processo de geração de energia (EPE, 2018).

Segundo os dados do Boletim de Energia Eólica do Brasil e Mundo, tendo como ano base 2016, produzido pelo Ministério de Minas e Energia, o Brasil se destaca por assumir o sétimo lugar dentre os países que mais produzem energia eólica no mundo, ultrapassando o Canadá que caiu para o oitavo lugar. E se tratando de expansão de potências, o Brasil em 2016 detinha a quinta posição, com uma produção de 2,50 GW (MME, 2017).

Segundo o ministério de minas e energia, a potência eólica contratado até 13/10/2017 era de 17,70 GW, onde 11,50 GW estavam em operação plena, 3,40 GW estavam em fase de construção, e 2,80 GW estavam dentro das conformidades técnicas e legais para iniciarem a construção. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2016, que estabelece metas para a expansão de energia até 2016 de até 25,80 GW, teria que contratar mais 8,10 GW

Até 13/10/2017, estavam contratados 17,70 GW de potência eólica, dos quais, 11,50 GW em operação, 3,40 GW em construção, e 2,80 GW aptos para iniciar a construção. Para atingir os 25,80 GW em 2026, previstos no PDE 2026, há que contratar, ainda, 8,10 GW.

Para 2026, a previsão do PDE2026, é que a capacidade instalada eólica brasileira chegue a 25,80 GW (inclusive geração distribuída), respondendo por 12,50% do total. A Região Nordeste (NE) deverá ficar com 90.00% da capacidade eólica total já que segundo o MME, foi uma das regiões que melhor apresentou um dos melhores indicadores de geração de energia, se destacando o estado do Piauí (MME, 2017).

Gráfico 2 - Potencial eólica contratado (MW).



Fonte: MME (2017).

Segundo dados do Banco de Informações da Geração (BIG), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o parque eólico nacional atingiu uma quantidade de geração de

eletricidade de 12.283,00 MW ao final de 2017. A produção de energia elétrica a partir de fonte eólica alcançou 42.373,00 GWh em 2017, equivalente a um aumento de 26,50% em relação ao ano de 2016, quando se atingiu 33.489,00 GWh. Em 2017, a potência instalada para geração eólica no país expandiu 21,30% (MME, 2017).

O Brasil por ter uma grande área continental, é um país com grande potencial de geração de energia eólica, ventos com velocidade satisfatória que atende as exigências técnicas para produção de energia elétrica, além de ser considerada uma fonte de energia limpa, não poluindo o meio ambiente, também é uma alternativa viável para a produção de eletricidade.

2.3.4 Geotérmica

A energia geotérmica, é a energia provinda através do calor oriundo do interior da terra. No interior do planeta, existem camadas que circundam o núcleo, como o manto, formado por material pastoso como as lavas de vulcões e a parte mais superficial que é a crosta terrestre, onde habitamos (EPE, 2018).

A crosta terrestre por sua vez, não possui uma espessura uniforme, tem suas variações ao longo de sua extensão. Além disso, não é uma camada única, é fraturada em várias partes chamadas de placas tectônicas. O magma que se forma no manto pode emergir para a superfície próximo ao limite das placas por forças endógenas (pressão no interior da terra). Essas rochas absorvem o calor do magma que se encontra em altíssima temperatura, aquecendo as águas subterrâneas que por consequência emerge através dos gêiseres que são nascentes termais, ou como são mais conhecidas “minas de água quentes” (EPE, 2018).

No entanto, para que se possa transformar esse vapor e água quente em energia elétrica, precisa-se perfurar poços, onde através os mesmos são canalizados dutos para conduzirem essa água e vapor quente para um gerador na superfície transforma-se essa energia geotérmica em energia elétrica. Entretanto, essa fonte de energia precisa atender algumas peculiaridades que lhe restringem um pouco, pois se limitam às regiões com altas atividades vulcânicas, locais de encontro de placas tectônicas, geralmente em países como Estados Unidos, Itália, Islândia. Já em países que fazem o seu processo de geração seja um pouco escasso e não tão atrativo para investimento em larga escala do ponto vista econômico, mesmo sendo energia limpa e renovável e que é produzida continuamente.

Se tratando de Brasil na produção desse tipo de energia para consumo, o mesmo ainda não dispões desse tipo de conversão, pois além de não atender a algumas exigências primordiais para a sua geração como fissuras de placas e grandes concentrações de vapores que nesse caso não gera interesse de investimento pelo baixo potencial que apresenta. Ainda,

usualmente, as poucas unidades que existem no país, são usadas mais com a finalidade de estética e lazer (NOVAES, 2009).

2.3.5 Nuclear

A energia nuclear, oriunda de um fenômeno natural ou artificial chamado radioatividade, que pela natureza de suas substâncias e elementos químicos, são capazes de emitir radiação, estas por sua vez são chamadas de partículas alfa, raios gama e betas (MME, 2017).

A radioatividade é uma forma de energia nuclear, onde é produzida a partir da radiação emitidas por átomos de alguns elementos químicos com o urânio (U), rádio (Ra), tório (Th), entre outros que são considerados como “instáveis” por emitirem radiação constantemente. O urânio inicialmente contém 92 prótons, mas ao longo dos séculos vai perdendo esses prótons em forma de radiação até se transformar em um outro elemento, o chumbo (Pb) possuindo 82 prótons que naturalmente fica estáveis (EPE, 2018).

Por outro lado, para a produção de energia elétrica desses elementos radioativos é preciso partir para um fenômeno artificial chamado de fissão nuclear, este por sua vez consiste no processo de divisão do núcleo de um elemento químico pesado em dois outros elementos mais leves e de massa aproximada, seja por recebimento de energia ou bombardeado por nêutrons (partícula elementar de átomo com carga neutra) (MME, 2017).

O Brasil está em fase de expansão da implantação de energia nuclear, principalmente onde existem grandes demandas energéticas além de elevado poder econômico para a sua implementação, pois é um sistema caro, com alto nível de infraestrutura e tecnológico, além de mão de obra muito bem qualificada.

Como seu grande potencial energético, a energia nuclear está cada vez mais em ascensão no país, principalmente por haver muitas reservas dos elementos utilizado na geração de nesse tipo de energia, diminuindo assim o uso de combustíveis de origem fóssil. Entretanto, a geração desse tipo de energia baseada em enriquecimento de materiais radioativos ainda tem uma grande resistência por parte da sociedade, uma vez que a palavra “nuclear” é vista como sinônimo de destruição, morte e desequilíbrio ambiental desde a segunda guerra mundial (1945) (MOLINARI, 2009).

Em face disso, é cada vez maior a busca desse tipo de energia por países para que além de suprir sua demanda energética, possam também abrir espaço para o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem mais segurança na produção e instalações, também na

sua durabilidade tendo em vista que uma usina nuclear tem uma vida útil curta, de apenas trinta anos (MOLINARI, 2009).

2.3.6 Biomassa

O Brasil é um país que reúne inúmeras vantagens comparativas que o tornam capaz de atuar como líder no mercado mundial de produtos agrícolas, agroindustriais e silviculturas, em particular aqueles dedicados a energia, provinda da biomassa. A biomassa é classificada como recurso energético nas categorias de biomassa energética providas de fontes florestais, culturas agrícolas agroenergéticas e dos resíduos de subprodutos das atividades agroindustriais, além da produção animal e rejeitos urbanos (BRASIL, 2007).

A biomassa de forma mais conceitual, é entendida como qualquer matéria de origem orgânica e tenha o poder de ser transformada em algum tipo de energia, seja ela mecânica, térmica ou elétrica. Conhecendo o seu potencial energético que dependerá dos processos tecnológicos envolvidos para processar a matéria orgânica para o melhor aproveitamento possível e obtenção de energia (MOLINARI, 2009).

Apesar de ser uma fonte de energia ainda recente, a biomassa vem ganhando cada vez mais espaço no setor, além de diminuir a dependência de outras fontes de combustíveis, também contribui para melhor o potencial energético na utilização de outros derivados de energia como, etanol, biodiesel e biocombustível, sendo um forte concorrente para a substituição dos combustíveis derivados do petróleo.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia – MME, com referência de dezembro de 2016, a biomassa voltou a ser a segunda fonte de geração mais importante do Brasil na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) - toda a energia necessária para movimentar a economia, principalmente na indústria e no setor sucroalcooleiro, teve como registro um percentual de 8,80% em 2016, superando os 8,10% de participação do gás natural (MME, 2016).

De um total de geração de 54,00 TWh por biomassa em 2016, o bagaço e a palha da cana contribuíram com 36,00 TWh, ou seja, 67,00% da produção. Os componentes da biomassa são, o bagaço, a palha da cana-de-açúcar, sendo que esta última é a principal utilizada para a produção de energia elétrica, os resíduos de madeira da produção de celulose, o biogás, a casca de arroz, dentre outros pouco significativos. O bom desempenho da bioeletricidade e de outras fontes como hidráulica e eólica, continuam impulsionando o crescimento da participação de energias renováveis no País. Segundo o boletim, o Brasil fechou o ano de 2016 com o total

de 82,70% de fontes renováveis na oferta interna de energia elétrica, contra o indicador de 75,50% verificado em 2015 (MME, 2016).

A produção de energia de biomassa vegetal ao comparar com a de biomassa animal tem algumas peculiaridades, pois ocorre somente em um curto período em que esta tecnologia estava em fase testes, porém, ainda é possível observar que esse modelo de usinas de pequeno porte abastecem pequenas populações, ressalta-se ainda que as usinas que utilizavam biomassa animal inicialmente tinham baixa aceitação social comparada com as usinas de biomassa de origem vegetal e que hoje a realidade é um pouco diferente, pois modelos mais eficientes com um potencial maior de aproveitamento e conversão de energia (MOLINARI, 2009).

2.3.7 Solar

Hoje em dia ao se tratar de potencial de produção de energia elétrica proveniente da energia solar além de ser considerada uma fonte de luz e calor inesgotável na escala de vida humana, também é uma das fontes alternativas de geração de energia mais promissora para o próximo milênio. Pois o seu potencial energético é muito elevado, com apenas 12 minutos de irradiação solar sobre a terra gera energia suficiente para suprir a demanda total no mundo por um ano se de fato esse gigantesco potencial fosse aproveitado totalmente (CRESESB, 2014 RÜTHER, 2004).

De acordo com a literatura, o sol é considerado o precursor das outras formas de energia, pois é através da energia vinda do sol que começa por exemplo o aquecimento das águas gerando o processo de evaporação que dá origem ao ciclo da água permitindo seu represamento para posterior geração de energia elétrica por meio das usinas hidroelétricas. A radiação solar também tem influência direta na produção de energia eólica, pois a radiação vinda do sol também interfere na circulação atmosférica, pois quando o ar mais próximo do solo fica mais quente, este por sua vez fica mais leve que tendencialmente irá para a parte mais alta da atmosférica fazendo o ar mais frio descer, com isso gera um deslocamento da massa de ar, com esse movimento, os ventos geram movimento no aerogeradores das turbinas de geração de energia elétrica através da eólica. O petróleo, gás natural e carvão, também são fontes de energia originalmente proporcionada através do sol, pois estas fontes de energias vêm de origem residual de animais, vegetais que se desenvolveram através da energia da radiação solar (CRESESB, 2014).

A energia emitida pelo sol sob a forma de ondas eletromagnéticas é comumente chamada de radiação solar, onde a mesma tem sua aplicação direta na forma de energia térmica e pode ser convertida em outras formas de energia como a mecânica e elétrica. Outra aplicação

da energia solar de forma direta seria através do efeito fotovoltaico que em termos mais simples consiste em transformar a energia provinda do sol em forma de radiação solar em energia elétrica (CRESESB, 2014; RÜTHER, 2004).

Por fim, o processo de transformação da energia solar em elétrica será bem mais detalhada nos próximos itens, pois é importante entender quais os princípios de funcionamento de um sistema de geração de energia baseado na irradiação solar, os principais equipamentos e componentes usados nesses sistemas, locais mais propícios e com um maior potencial energético para que o sistema seja mais proveitoso assim como algumas peculiaridade sobre métodos de obtenção de dados solarimétricos.

2.3.7.1 Princípios da radiação solar

A princípio, é importante que se faça um estudo mais aprofundado para entender de forma significativa como se dá seu princípio de funcionamento, também é de grande importância entender que a radiação solar é a propriedade pioneira pra a energia térmica e solar fotovoltaica além de seus princípios de funcionamento (SILVA JUNIOR, 2017).

Segundo (CRESESB, 2014), o movimento realizado anualmente ao redor do sol pelo planeta terra é chamado de translação, e esse movimento sendo realizado de forma elíptica tem o poder de causar certas variações no fluxo de radiação solar em determinados locais, alterando assim as condições de produção de energia, influenciando diretamente no potencial de geração daquela localidade específica.

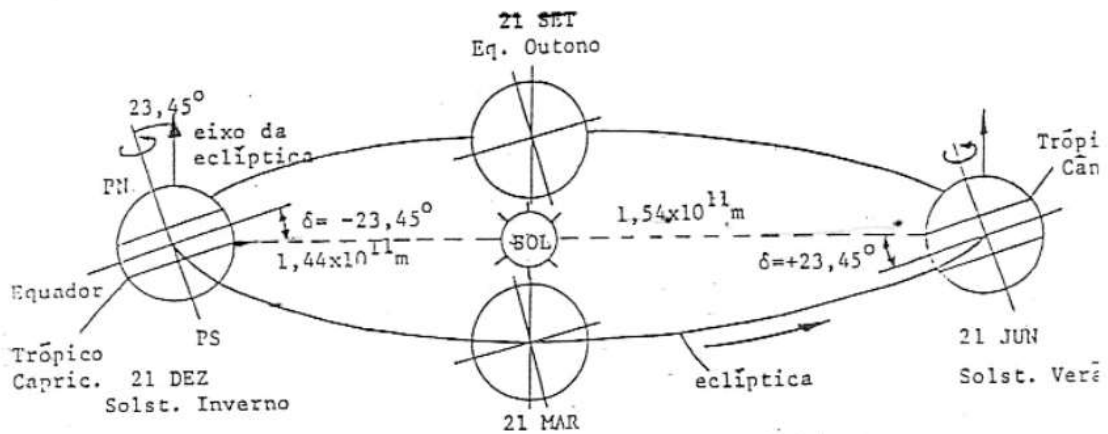
Anualmente sol fornece para a terra cerca de $1,50 \times 10^{18}$ kWh de energia que corresponde a 10.000,00 vezes ao consumo mundial de energia no período de um ano, ou seja, o sol além de ser uma fonte inesgotável de energia na escala humana também apresenta um grande potencial de utilização por meios de captação tecnologias que permitam sua captação e conversão em outra forma de energia que possa ser aproveitada como por exemplo a elétrica, térmica, entre outras (CRESESB, 2014).

Como já mencionado anteriormente, o planeta terra movimenta-se de forma elíptica anualmente ao redor do sol, essa trajetória elíptica tem uma variação de inclinação de aproximadamente $23,50^\circ$ em relação ao plano equatorial e isso é responsável pela variação da posição do sol no horizonte ao longo do dia, e que inclusive também é responsável pela mudança das estações do ano o que por sua vez dificulta calcular a posição do sol para uma data qualquer (CRESESB, 2014).

Em relação ao plano equatorial (Norte), a posição angular do sol ao meio dia é chamado de Declinação Solar (d), e dependendo do dia do ano, está também pode variar entre

os limites de $-23,45^\circ < d < 23,45^\circ$. Sabendo desse parâmetros, e somando-se o valor da declinação com o da latitude local, pode-se determinar a trajetória do movimento aparente do sol num determinado dia e lugar do globo terrestre (CRESESB, 2014).

Figura 1 - Órbita da Terra em torno do Sol com eixo N-S inclinado a um ângulo de $23,45^\circ$.



Fonte: CRESESB (2014).

De acordo com (CRESESB, 2014), o fato de o eixo da terra ter uma inclinação em relação ao norte, faz com afete a duração dos dias durante o ano em alguns pontos no globo terrestre. Locais esses que são mais afetados no hemisfério sul e são observado dias mais curtos no solstício de inverno e dias mais longos durante o solstício de verão, já em regiões próximas a linha do equador a duração do dia geralmente são iguais (CRESESB, 2014).

O termo “radiação solar” é utilizado em sua forma mais abrangente como sendo a descrição do fluxo de potência, ou seja, é a energia liberada pelo Sol, principalmente sob forma de ondas eletromagnéticas. A irradiação solar é a propagação de energia sem a necessidade de meio material, e a quantidade de irradiação solar em determinado intervalo de tempo geralmente, é medida em watt por hora por metro quadrado (Wh/m^2), portanto, é denominada potência por unidade de tempo (CRESESB, 2014). Porém, outras unidades de medidas são usadas como forma de representa-la e convertê-la como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Unidades para a radiação solar (irradiância e irradiação).

De:	Para:	Fator de Multiplicação:
cal/cm ² .min	W/m ²	697,80
W/m ²	cal/cm ² .min	1,43x10 ⁻³
W/m ²	Mcal/cm ² .s	2,39x10 ⁻²
MK/m ² .dia	kWh/m ² .dia	2,78x10 ⁻¹
Langley/dia	kWh/m ² .dia	1,16x10 ⁻²
cal/cm ²	J/cm ²	4,19
cal/cm ²	kWh/m ²	1,16x10 ⁻²
J/cm ²	cal/cm ²	2,39x10 ⁻¹
J/cm ²	kWh/m ²	2,78x10 ⁻³
kWh/m ²	cal/cm ²	85,99
kWh/m ²	J/cm ²	360,00
Langley	cal/cm ²	1,00

Fonte: Adaptado, CRESESB (2014).

De forma geral, a radiação provinda do sol apresenta certas particularidades e complexas propriedades, fazendo-se necessário posteriores estudos para melhor compreender como seu fluxo de radiação solar se altera dependendo da mudança de certas condições partindo do sol, passando pelo vácuo do espaço e por diferentes meios materiais de propagação até chegar à superfície terrestre.

Um das principais causas que podem influenciar a forma como a radiação solar chegue até a superfície terrestre é os componentes atmosféricos e terrestres, pois estes por sua vez podem influenciar tanto na intensidade da radiação recebida como também sua distribuição espectral e variação angular que são de extrema importância para identificar o fluxo de radiação solar sobre uma determinada região no globo terrestre. Porém, para esta pesquisa, serão usados para obtenção de dados solarimétricos da região em estudo, banco de dados que já possuem esses valores agrupados juntamente com suas coordenadas geográficas e respectivos ângulos de inclinação.

2.3.7.2 Dispositivos para medição da irradiação solar

As medias de irradiação solar compões uma base de dados e vem sendo monitorada há alguns anos. Estas bases de dados são de extrema importância técnico-científica para a

elaboração de estudos de viabilidade técnica-financeira de projetos que têm como objetivo o aproveitamento da radiação solar como fonte para geração de energia (EPE, 2017).

A importância de se obter dados solarimétricos de forma experimental e valores instantâneos da irradiação de uma determinada região, reflete na escolha do melhor local onde poderá ser instalado o sistema de geração de energia solar. Realizar o dimensionamento do gerador, estimar o potencial de geração do sistema, entre outros fatores, para o máximo aproveitamento do potencial solar, além de reduzir custos desnecessários, facilita a geração de energia a partir de radiação solar (CRESESB, 2014).

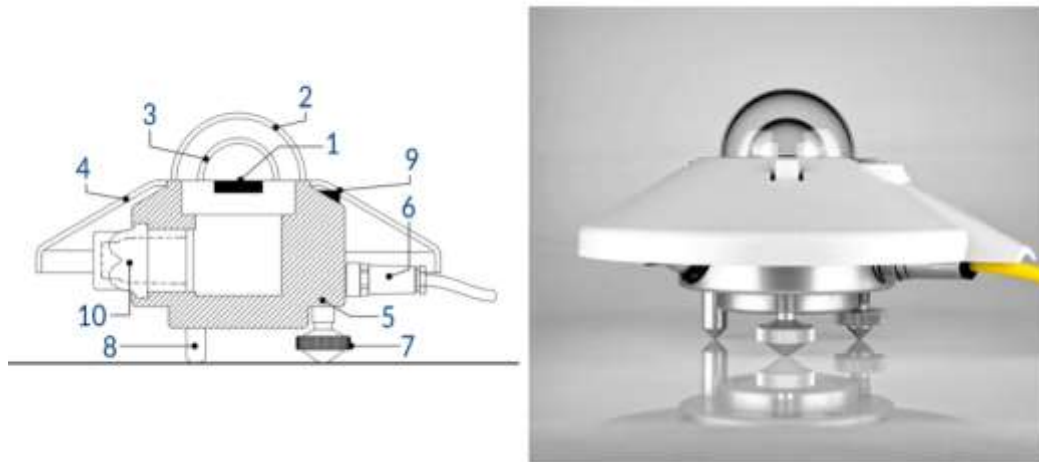
Nesse contexto, é importante fazer uma breve exposição dos principais dispositivos utilizados para a medição e aquisição de dados da radiação solar de forma a atenda com qualidade as exigências requeridas pelo setor energético e abordar boas práticas que possam aumentar a eficiência na realização das medições de dados solarimétricos (CRESESB, 2014).

Como já mencionado anteriormente, a radiação vinda do sol até a superfície da terra sofre algumas interferências que vão desde o movimento de rotação e translação da terra, até mesmo espacial e temporal. Vale destacar que essa interferência também pode ser afetados por fatores atmosféricos e climáticos, como o nível de nebulosidade, concentração de gases poluentes na atmosfera e isso influencia diretamente no tipo de equipamento utilizados para a obtenção desses dados, pois os mesmos devem ser sensíveis de modo a detectar essas interferências de forma a não prejudicar a obtenção dos dados pretendidos (EPE, 2017).

Hoje no mercado, existem dois dispositivos muito difundidos e utilizados para a obtenção de dados solarimétricos. O piranômetro e o pirheliômetro, sendo que o primeiro ainda tem dois tipos, o piranômetro de termopilha (termoelétrico) e o piranômetro de fotovoltaico (fotodiodo). O piranômetro, é caracterizado por realizar as medições solarimétricas de forma global, enquanto que o pirheliômetro mede apenas as componentes diretas da radiação solar devido a um colimador com abertura diretamente para o sensor (CRESESB, 2014; EPE, 2017).

O piranômetro de termopilha, é um dispositivo utilizado para a medição da irradiação solar, usa uma termopilha que converte a energia térmica provida da radiação solar em energia elétrica. A termopilha é recamada por uma tinta preta, que tem a função de simular um “corpo negro” que por sua vez absorve toda a energia radiante e sendo convertida em uma diferença de potencial elétrico proporcional a irradiação incidente na termopilha (EPE, 2017). A figura 2 mostra de forma ilustrativa o piranômetros de termopilha.

Figura 2 - Representação gráfica e imagem de um piranômetro de termopilha.



Fonte: KIPP & ZONE (2016).

Segundo EPE (2017), piranômetro de termopilha possui uma das melhores curva de resposta na faixa espectral entre 300,00 e 3000,00 nm com um ângulo sólido de 180,00° o que o leva para a redução de incertezas nas medições, sendo assim o instrumento com menor incerteza para medir a radiação solar, com desvios até mesmo inferiores a 1,00% de acordo com sua classificação.

O piranômetro fotovoltaico ou fotodiodo, é constituído de células semicondutoras que tem a capacidade de converter diretamente a radiação solar na mesma proporção da irradiação solar incidente sobre ela. Entretanto, esse tipo de dispositivo apresenta algumas incertezas nas suas medições, pois esse o mesmo apresenta diferenciação nos dados medidos principalmente com a variação da luminosidade como em dias de céu mais claros ou mais nublados. Ainda também apresenta ligeira variação nas medições por serem mais sensíveis a ruídos, sua faixa de precisão é um pouco menor e pode variar em até 5,00%, se comparado com o termopilha. Em contrapartida, como seu funcionamento é puramente elétrico, fica livre de inércia térmica, também é mais barato que o termopilha.

Para a suas aplicações onde os requisitos de incertezas não sejam tão limitados como agrometeorologia, meteorologia ou mesmo para obtenção dedados solarimétricos de uma dada região, esse dispositivo pode ser usado para que se possa obter dados de caráter exploratório como em uma rede de sistemas de monitoramento meteorológico (EPE, 2017).

Figura 3 - Piranômetro e fotodiodo de silício.



Fonte: KIPP & ZONE (2016).

O perheliômetro é um dispositivo que permite medir a irradiação solar direta com incidência normal a superfície, usa o mesmo princípio de medida do piranômetro de termopilha, ou seja, converte a energia térmica em energia elétrica. Como já mencionado anteriormente, esse dispositivo tem acoplado um colimador que é um dispositivo que absorve e direciona a radiação solar para uma área específica do sensor (EPE, 2017).

O colimador possui um ângulo fixo de abertura padrão de $5,00^\circ$, além disso, o dispositivo deve sempre estar acoplados em um outro sistema que rastreia o ângulo e a posição do sol para que o equipamento sempre esteja direcionado diretamente para o sol como mostra a figura 4 a seguir, além de possuir um orifício que possibilita que a luz solar seja projetada na sua borda inferior, permite também a verificação do alinhamento do equipamento (EPE, 2017).

Figura 4 - Representação gráfica e imagem de um Pirheliômetro.



Fonte: KIPP & ZONE (2016), adaptado.

Possui ótima resposta para os comprimentos de onda de 300,00 a 2800,00 nm, pois cobre todas as faixas de ondas curtas do espectro solar. Sendo assim, tanto os dispositivos de medição de radiação solar direta quanto difusa recebem uma classificação pela International Standards Organization 9060 (ISO 9060), dependendo o grau de precisão que os mesmos apresentam, além de periodicamente os sensores precisam passar por calibração *int-situ*, determinadas de acordo as normas ISO 9847 e a 9059 (CRESESB, 2014; EPE, 2017).

2.4 Geração de energia solar fotovoltaica

A geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica se dá pelo processo de conversão direta da luz solar em eletricidade através do “efeito fotovoltaico”. O efeito fotovoltaico dar-se pela excitação dos elétrons de certos materiais (semicondutores) na presença de luz solar, segundo Alexandre Edmond Becquerel (1839), o efeito voltaico promove numa estrutura de material semicondutor uma diferença de potencial em seus extremos, produzido pela absorção da luz solar. O princípio do efeito fotovoltaico é entendido através conhecimento das propriedades químicas dos componentes das células fotovoltaicas (CRESESB, 2017).

As células fotovoltaicas são as unidades fundamentais para esse processo de conversão, pois dentre os materiais com características que mais se adequam ao processo de conversão da radiação solar em energia elétrica é o silício (Si), nas suas formas cristalinas (c-Si) que ainda podem ser dividida em monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si). Também na forma de amorfo hidrogenado (a-Si:H), telureto de cádmio (CdTe), dentre outros, pois possuem certas características intrínsecas. A eficiência de conversão dessas células são determinadas através da medida da proporção da radiação solar que incide sobre a mesma, para que seja convertida em energia elétrica (CRESESB, 2014; PORTAL SOLAR 2019).

Inicialmente, a tecnologia de conversão de energia solar fotovoltaica era usada apenas pelas agências espaciais como forma de obtenção de energia elétrica para os satélites que orbitavam o planeta, seus custos eram muito elevados, contudo, ao longo dos anos essa tecnologia foi evoluindo e se tornando mais acessíveis a sua aquisição devido a diminuição no preço o que hoje já possibilita sua utilização nas mais diversas atividades que demandam por energia elétrica, principalmente em locais mais remotos e de difícil acesso físico das linhas convencionais de transmissão de energia elétrica fornecidas pelas empresas da área (CRESESB, 2014; RÜTHER, 2004).

A classificação do sistema fotovoltaico (SFV) é definido por norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), mais especificamente NBR-11704/2008 – Sistema Fotovoltaico, que trata de da classificação desses sistemas além de algumas definições.

Quanto a sua classificação propriamente dita dos SFVs, a NBR-11704/2008, destaca da seguinte forma:

- **Quanto à interligação com o sistema público de fornecimento de energia elétrica.**
 - a) sistemas isolados: são aqueles que não possuem qualquer conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica;
 - b) sistemas conectados à rede elétrica: são aqueles efetivamente conectados ao sistema público de fornecimento de energia elétrica.
- **Quanto à configuração.**
 - a) sistemas puros: são aqueles que utilizam gerador fotovoltaico como único gerador de energia elétrica;
 - b) sistemas híbridos: são aqueles que resultam da associação do gerador fotovoltaico com outros tipos de geradores de energia elétrica.

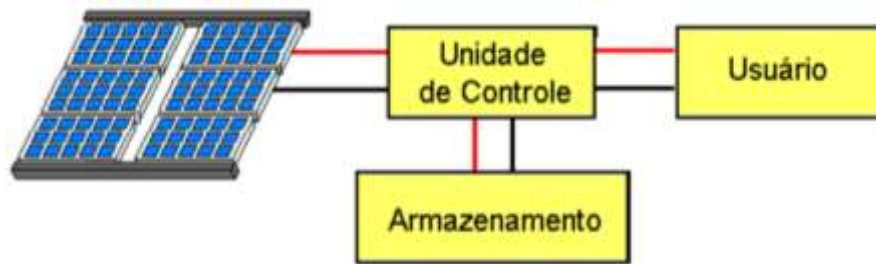
Segundo a norma, na parte que refere aos tipos de interligação do SFV, pode-se observar que o primeiro tipo é o sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), por serem um tipo de ligação onde é totalmente isolada da rede pública de fornecimento de energia elétrica, demanda de mais equipamentos, principalmente baterias pra o armazenamento da energia gerada e por consequência, impactará diretamente no aumento do valor de implantação do projeto.

Já no segundo tipo, sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), esse custo fica mais barato do que o SFI, pois como o seu funcionamento é interligado diretamente na rede pública de fornecimento de energia, o que nesse caso não precisa de equipamentos adicionais para o armazenamento da energia gerada.

Entretanto, o princípio de funcionamento desse tipo de sistema é basicamente o mesmo do SFI, pois apresentam os seguintes equipamentos comuns que são eles, os módulos fotovoltaicos que funcionam como geradores, controladores e condicionamento de potência, inversor de carga de corrente contínua (cc) para corrente alternada (ca) (CRESESB, 2014).

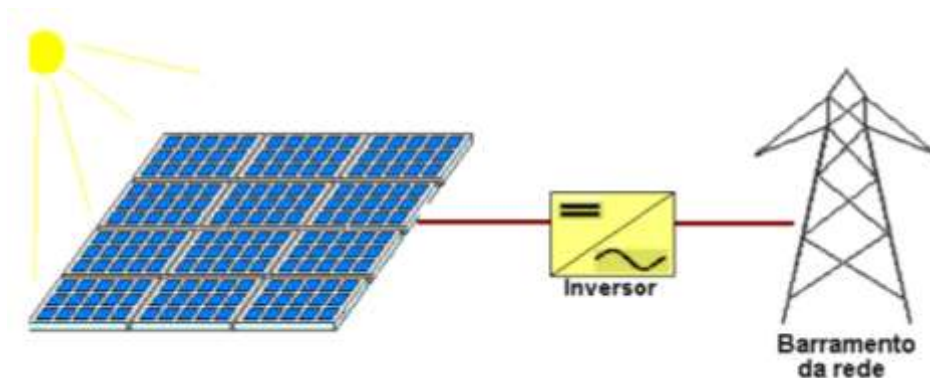
As figuras abaixo mostram de forma básico a configurações esquemáticas de cada um dos sistemas.

Figura 5 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico isolado (SFI).



Fonte: CRESESB (2014).

Figura 6 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR).



Fonte: CRESESB (2014).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) por ser abordado não só pela literatura, mas também levando-se em consideração aspectos técnicos de projeto e implantação de forma geral, é um sistema que se mostra mais acessível por demandar um investimento bem menor que o sistema fotovoltaico isolado (SFI), então, em decorrência desses aspectos, o SFCR, será o principal foco deste trabalho.

2.4.1 Princípios de funcionamento das células fotovoltaicas

De acordo com o que já foi abordado previamente em capítulos anteriores aos quais se relata sobre os materiais usados na produção das células fotovoltaicas como é o caso dos semicondutores, nesse tópico serão abordados os materiais e suas variações utilizados para esse propósito.

A natureza desses materiais usados na produção das células fotovoltaicas influencia diretamente no rendimento de sua eficiência, por isso é tão importante que se conheça os principais constituintes desses materiais e suas propriedades.

A seguir, serão demonstrados os semicondutores mais usados atualmente no mercado para produzir as células fotovoltaicas segundo sua eficiência e utilização (RÜTHER, 2004).

Segundo PORTAL SOLAR (2019), a maioria das células fotovoltaicas são fabricadas usando como matéria-prima o silício (Si), o mesmo ainda pode ser constituído de cristal, o silício cristalino (c-Si) que ainda pode subdividir-se em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si) ou silício amorfo (a-Si), também apresentando-se outra tecnologia como o telureto de cádmio (CdTe).

As tecnologias dos semicondutores supracitados, usados para a confecção das células fotovoltaicas, podem ser divididas em dois grupos, os de lâminas cristalinas e os de películas finas. Os que compõem o grupo dos c-Si são o silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si), já os outros, como o silício amorfo (a-Si) e telureto de cádmio (CdTe) fazem parte do grupo das películas finas, sendo que esse último, a sua tecnologia que formam os módulos fotovoltaicos têm grande relevância no custo de implantação do sistema (RÜTHER, 2004). A seguir, informações mais detalhadas sobre os materiais semicondutores usados na produção das células fotovoltaicas, assim como suas principais características que irá influenciar diretamente na eficiência do sistema e valor de implantação.

2.4.1.1 Silício cristalino(c-Si)

De acordo com SOUZA (2017), o silício (Si) é um dos materiais mais abundantes encontrados na natureza, são encontrados em areia de quartzo ou mesmo depósitos naturais de Si. A grande maioria dos painéis fabricados hoje no mundo, cerca de 80,00% são feitos de silício nas suas mais variadas formas.

Segundo PORTAL SOLAR (2019), todos os sistemas de geração de energia solar fotovoltaico instalados em residências e empresas em todo o mundo em 2018, usaram alguma tecnologia baseada em Si, pois esse material usado na fabricação de painéis solares podem assumir diversas formas e essa diversificação do Si se dá pelo grau de sua pureza, ou seja, sua pureza está intimamente ligada ao melhor alinhamento de suas moléculas, pois quanto mais alinhadas suas moléculas estiverem mais a placa será eficiente na conversão da luz solar em energia elétrica. Existem certos procedimentos para melhorar a pureza do Si, porém, pela natureza dos processos serem caros isso impactará diretamente no valor final do painel solar (cerca de 55,00 a 60,00% do valor do painel), deixando-o mais oneroso.

O c-Si, é utilizado na sua formação lâminas cristalinas com dimensões de diâmetro de aproximadamente 10,00 cm, e com 300,00 a 400,00 µm de espessura, pois de acordo com a

tecnologia usada na formação dos módulos fotovoltaicos (associação e encapsulamento de várias células fotovoltaicas) irá impactar diretamente no valor dos módulos (RÜTHER, 2004).

As células fotovoltaicas feitas de c-Si, apresentam-se como as mais tradicionais e consistentes hoje no mercado, apresentando grande índices de utilização. Diante disso, as células de c-Si ainda podem se apresentar nas formas de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), duas formas do c-Si muito utilizadas na produção de placas solares fotovoltaicas que serão mais detalhadas a seguir (CRESESB, 2014).

- Silício monocristalino (m-Si)

As células fotovoltaicas construídas a partir do silício monocristalino (m-Si), além de ser uma tecnologia usada a bastante tempo, também possui uma das maiores eficiências dos painéis hoje presente no mercado, e por essa razão são bastante utilizados em grande escala pela indústria de painéis fotovoltaicos.

Segundo CRESESB (2014), o silício monocristalino (m-Si) pode ser apresentado da seguinte forma:

A célula de silício monocristalino é historicamente as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98,00 e 99,00% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,99%. Para se utilizar o silício na indústria eletrônica além o alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar as qualificações desejadas é chamado “processo Czochralski”. O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientada e sob rígido controle de temperatura, vai se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300,00µm. Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800,00 a 1000,00°C.

O m-Si possui coloração uniforme que facilita o reconhecimento de sua característica que é um alto teor de pureza, produzidos sob pressão atmosférica controlada e velocidade de crescimento do cristal extremamente lentas (cm/hora). Possui arquitetura de seus cantos arredondados. Eles são feitos a partir de um único cristal de silício ultrapuro, (lingotes de silício com forma cilíndrica), este por sua vez é fatiado, fazendo-se assim lâminas individuais de silício que seguidas desse tratamento são transformadas então em células fotovoltaicas. Os painéis solares são compostos por um conglomerado de células fotovoltaicas que podem assumir formações em série e paralelo (PORTAL SOLAR, 2019).

Figura 7 - Paineis solar fotovoltaico monocristalino.



Fonte: PORTAL SOLAR (2019).

Os painéis solares de m-Si, por possuírem uma grande taxa de eficiência constatada hoje no mercado, eles necessitam de menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia elétrica que painéis utilizando outras tecnologias, pois tendem a ter um melhor desempenho em relação aos painéis solares policristalinos em condições de baixa luminosidade. Quanto a vida útil dos painéis m-Si são pelo menos 30 anos, sendo que vem com uma garantia do fabricante de 25 anos (PORTAL SOLAR, 2019).

A tabela 3, mostra as principais características e especificações das placas de silício monocristalino (m-Si).

Tabela 3 - Especificações das placas m-Si.

Especificações m-Si	
Eficiência	15,00 – 22,00%
Forma	Arredondas ou em formato de lâmina
Tamanho	10,00x10,00 cm ou 12,50x12,50 cm; diâmetro 15,00 ou 15,00 cm
Espessura	0,30 mm

Fonte: Adaptado, PORTAL SOLAR (2019).

- Silício policristalino (p-Si)

Os painéis de silício policristalino (p-Si) e silício monocristalino (m-Si) são feitos do mesmo material base, o silício (Si), no entanto, eles diferem na tecnologia aplicada para fundir os cristais, pois no caso do p-Si, os cristais de silício são fundidos em blocos que condicionará a formação de múltiplos cristais, dando assim a origem do nome “policristalino”, e ao ser cortado em fatias é possível observar essa formação múltiplas dos cristais (CRESESB, 2014; PORTAL SOLAR, 2019)

As células de silício policristalino (p-Si), apresentam uma menor eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica do que as feitas de silício monocristalino (m-Si), pois apresentam um custo menor no processamento para obtenção do cristal e com isso, resulta em um blocos com inúmeros cristais e que nos mesmos apresentam grande números de imperfeições, fazendo com que o material tenha uma eficiência inferior do que o m-Si no processo de conversão de energia fotovoltaica em elétrica (CRESESB, 2014; RÜTHER 2004).

Figura 8 - Painel solar fotovoltaico policristalino.



Fonte: PORTAL SOLAR (2019).

De acordo com o que já foi esboçado anteriormente, a célula fotovoltaica de p-Si tem sua eficiência de conversão inferior à placa de m-Si, entretanto, o custo energético de redução dessa célula é bem menor que a da célula de m-Si, e por essa razão destaca RÜTHER (2004), houve um aumento significativo de sua participação no mercado, na ordem dos 50,00% da tecnologia usando o silício.

A tabela 4, mostra as principais características e especificações das placas de silício policristalino (p-Si).

Tabela 4 - Especificações apresentadas pelo p-Si.

Especificações p-Si	
Eficiência	14,00 – 20,00%
Forma	Quadradas
Tamanho	10,00x10,00 cm, 12,50x12,50 cm, 15,00x15,00 cm
Estrutura	Fundição de polisilício, aquecimento em forma, formando-se vários cristais de silício com orientações diversas ou multicristalinas.
Espessura	0,30 mm
Cor	Azul (com antirreflexo), cinza prateado (sem antirreflexo)

Fonte: Adaptado, PORTAL SOLAR (2019).

2.4.1.2 Silício amorfo (a-Si)

O silício amorfo (a-Si) é tecnologia pioneira no setor de células fotovoltaicas, pois a partir da década de 80 essa tecnologia baseada em filmes finos começou a ser produzida de forma comercialmente viável, sendo empregado em células fotovoltaicas em meados da década de 70 (RÜTHER, 2004).

As células de a-Si, apresentam uma grande desordem na estrutura de seus átomos, e por essa razão difere das demais células m-Si e p-Si apresentadas anteriormente. Como produção de energia elétrica baseada nesse tipo de tecnologia era muito baixa, era usada apenas em baixa escala principalmente em equipamentos de baixo consumo elétrico, como por exemplo as calculadoras de bolso. Porém, com os avanços tecnológicos, foi possível utilizar e aplicar sua tecnologia em maiores escalas principalmente depois da utilização da técnica de empilhamento, que consiste na combinação de várias placas do a-Si, que ao serem combinadas conseguem obter maiores taxas de eficiências na produção de energia elétrica, cerca de 6,00 a 9,00% (CRESESB, 2014; PORTAL SOLA, 2019). PORTAL SOLA, 2019).

A utilização do a-Si em células fotovoltaicas, tem apontado grande potencial no mercado, tanto no potencial de suas propriedades elétricas como também pelo fato de o seu processo de fabricação ser mais barato, além de apresentar uma boa absorção de radiação solar

dentro da faixa do visível também pode ter a deposição de vários tipos de substratos no seu processo de fabricação, o por sua vez lhe torna uma forte tecnologia a ser usada em fabricação de células fotovoltaicas de baixo custo. O seu processo de fabricação é relativamente simples, quando comparada as outras tecnologias, também possibilita a sua construção em grandes áreas com baixo consumo de energia elétrica na fabricação (CRESESB, 2014).

Figura 9 - Paine solar de silício amorfo (a-Si).



Fonte: PORTAL SOLAR (2019).

Porém, mesmo apresentando relativamente baixos custos em seu processo de fabricação, o a-Si apresenta algumas desvantagens como, baixa eficiências de conversão de energia solar em energia elétrica, quando comparadas ao m-Si e ao p-Si, também apresenta degradação denominado *Efeito Staebler-Wronski*, que é o desgaste das propriedades das células fotovoltaica pela luz em suas estrutura logo nos meses iniciais de sua utilização, havendo assim uma significativa redução gradativa na sua eficiências de produção de energia ao longo da sua vida útil (CRESESB, 2014).

Apenas 1,00% do silício utilizado em células solares de silício cristalino é necessário nas células solares de silício amorfo. Por outro lado, o empilhamento é caro (PORTAL SOLA, 2019).

A tabela 5, mostra as principais características e especificações das placas de silício amorfo (a-Si).

Tabela 5 - Especificações apresentadas pelo a-Si.

Especificações a-Si	
Eficiência	6,00 – 9,00 %
Forma	Formato livre
Tamanho	0,77x2,44 m; 2,00x3,00 m
Espessura	1,00 – 3,00 mm
Cor	Castanho avermelhado a azul escuro

Fonte: Adaptado, PORTAL SOLAR (2019).

2.4.1.3 Telureto de cádmio (CdTe)

O telureto de cádmio (CdTe) é um material também usado na fabricação de células fotovoltaicas, essa tecnologia é aplicada em painéis solares com películas finas e recentemente se mostrou um grande concorrente das tecnologias baseada em silício cristalino (c-Si) na forma de filmes finos e custo/eficiência em uma significativa parcela do mercado e células fotovoltaicas, tendo como eficiência essa tecnologia de 9,00 a 16,00% (PORTAL SOLAR, 2019, SOUZA, 2017).

Os módulos fotovoltaicos baseados na tecnologia de CdTe, geralmente se apresentam sob a forma de placa de vidro, de cores mais escuras, geralmente azul escuro, verde-escuro, marrom e além da sua função primária que é conversão de energia solar em energia elétrica, também tem uma forte aceitação por oferecer características em sua arquitetura para ser usada como objeto de decoração (RÜTHER, 2004; SOUZA, 2017).

Figura 10 - Painel solar de telureto de cádmio (CdTe).



Fonte: PORTAL SOLAR (2019).

No quesito produção, os módulos fotovoltaicos baseado na tecnologia de CdTe apresentam baixos custos em grandes escalas, fator esse que faz dessa tecnologia um forte competidor no mercado de placas solares. Entretanto, o CdTe possui algumas desvantagens, primeiro pelo fato de haver pouca disponibilidade de seus componentes e segundo que o CdTe em seu formato mais grosso é um elemento tóxico, mas somente em sua forma grossa, os usados na produção das placas solares são de forma controlada e não oferecem riscos (RÜTHER, 2004; SOUZA, 2017).

As placas fotovoltaicas de CdTe, geralmente são usadas em instalações de grandes áreas, grandes campos solares o que corresponde a usinas de geração de energia solar fotovoltaica (SOUZA, 2017; PORTAL SOLAR, 2019).

A tabela 6, mostra as principais características e especificações das placas de telureto de cádmio (CdTe).

Tabela 6 - Especificações apresentadas pelo CdTe.

Especificações CdTe	
Eficiência	9,00 – 16,00%
Forma	Formato livre
Tamanho	1,20 x 0,60 m
Espessura	3,00 mm para o substrato com $8,00 \times 10^{-3}$ mm de revestimento
Cor	verde-escuro, azul escuro, marrom ou preto

Fonte: Adaptado, PORTAL SOLAR (2019).

3 METODOLOGIA

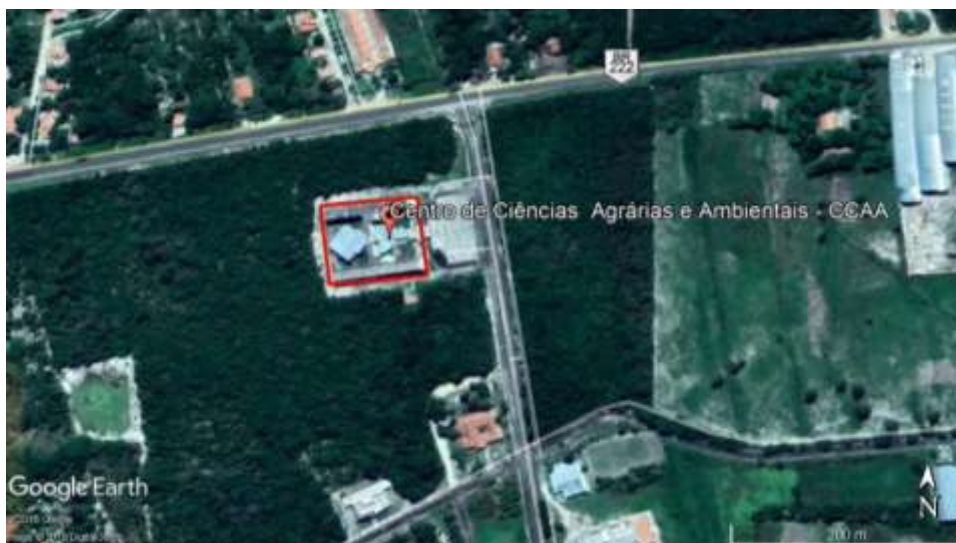
O presente trabalho se faz necessário para analisar a viabilidade técnica-financeira para implantação de sistema fotovoltaico (SFV) para a geração de energia elétrica como forma de suprir a demanda energética do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA). Diante disso, será explorado nesse capítulo o tipo de metodologia e procedimentos utilizados, assim como a descrição do local onde o estudo foi realizado, descrição dos recursos locais para a implantação do SFV, assim como dimensionamento do mesmo para que se possa dar mais consistências e validade técnico-científico ao presente trabalho. A verificação da viabilidade técnica-financeira de implantação do SFV, será baseado, na capacidade de geração de energia e da capacidade do projeto em agregar valor suficiente para dar retorno ao capital investido.

O presente trabalho é elaborado como forma de estudo de caso onde se busca em meio à levantamento de informações prévia do material de estudo, como a identificação de fatores inerentes de forma mais aprofundada que condicionam a geração de energia solar fotovoltaica, entender os possíveis cenários para resolver problemas pelo método experimental e por tentativa e erro, também mediante a análise dos dados levantados, busca-se solucionar problemas reais baseados em parâmetros técnicos que irão nortear a forma mais eficiente da implantação do sistema.

3.1 Descrição do Local de Estudo

O presente trabalho foi realizado nas dependências do campus universitário da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), no Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), ao lado da BR-222, com localização geográfica de latitude: 3°43'58.48"S e longitude; 43°19'8.18"O, situado na cidade de Chapadinha – MA, no leste maranhense. O campus universitário atualmente fornece educação de nível superior não só para alunos do município de Chapadinha, mas também de todo o Brasil que buscam educação de nível superior na área das ciências agrárias. O campus oferta atualmente quatro cursos a nível de graduação, (engenharia agrícola, zootecnia, agronomia e ciências biológicas), dois a nível de pós-graduação (mestrado em ciência animal, e mestrados em ciências ambientais), tendo seu funcionamento em dois turnos, matutino e vespertino.

Figura 11 - Localização do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais - CCAA, na cidade de Chapadinha-MA.



Fonte: Autor (2019).

O prédio do CCAA tem um formato de “H”, possui três pavimentos, sendo o primeiro pavimento o térreo, o segundo pavimento o primeiro andar e o terceiro pavimento o segundo andar, além disso, possui laje de cobertura em toda a extensão do seu teto, sendo contabilizados 1702,50 m² de laje de cobertura, onde a mesma pode ser usada como área de cobertura útil para a montagem dos módulos fotovoltaicos (FVs) ou pelo menos em partes, o que já favorece de certa forma o projeto, pois já diminuía a demanda por área nos seus arredores para a implantação do projeto.

Figura 12 - Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA).



Fonte: Autor (2019).

O prédio do CCAA dispõe de sua estrutura montada no sentido leste oeste, sem limitações de sombreamento na área descrita anteriormente como área de cobertura útil, havendo apenas as variações diárias em relação ao ângulo de incidência dos raios solares pelo processo natural de rotação da terra em seu próprio eixo (rotação), e simultaneamente ao redor do sol (translação).

3.2 Levantamento de dados solarimétricos da região em estudo

As principais informações a serem levantadas para análise de viabilidade de implantação do sistema fotovoltaico são os recursos solares da região, pois pela própria natureza do SFV onde o mesmo usa a radiação solar como combustível para a conversão em energia elétrica, essas informações são de extrema importância quando se deseja implantar um projeto dessa natureza, pois são a partir delas que se pode definir a viabilidade de implantação do projeto, permitindo assim reduzir riscos técnicos do projeto.

Geralmente os dados solarimétricos não são iguais para todas as regiões, sendo específicos para cada região em decorrência de vários fatores que podem influenciar nessa variação. Um dos principais fatores responsáveis por essas divergências de dados é o próprio globo terrestre, pelo seu formato irregular (oval), o ângulo de radiação solar sobre um determinado ponto no globo logo é diferente em relação a um outro ponto, fatores ambientais, geográficos e topográficos também influenciam bastante nessa disparidade entre os dados solarimétricos. É coerente que em locais que tenham uma presença maior de nuvens a radiação direta do sol fique prejudicada, já em locais sem o adensamento de nuvens a radiação solar direta é mais eficiente para a produção de energia elétrica.

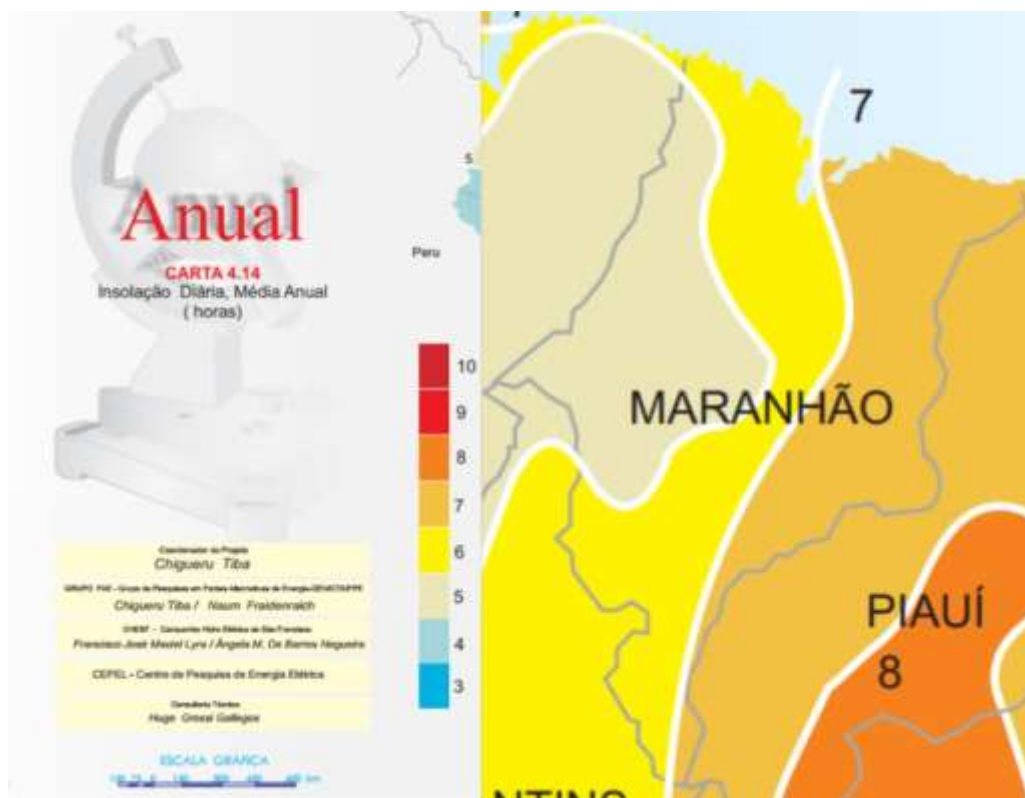
Para que se possa produzir energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica, os FVs dependem de dois parâmetros básicos, a temperatura e radiação solar. A temperatura pode ser controlada pela própria propriedade térmica dos módulos fotovoltaicos, pois a temperatura tem grande influência no seu desempenho elétrico, tendo em vista que boa parte da radiação solar absorvida pela placa não é totalmente convertida em energia elétrica, parte é dissipada em forma de calor o que por sua vez faz com que o sistema perca eficiência e comprometa o desempenho. O mesmo precisa funcionar em uma temperatura ideal, quanto menor a temperatura, maior o rendimento do sistema. Já a radiação solar, esta apresenta ligeiras oscilações em intervalos de tempo (segundos) o que por ventura veio a ser observada e estudada de forma mais prática para que se pudesse determinar a quantidade de energia solar um dado local recebe ao longo do dia, surgindo assim o conceito de Horas de Sol Pleno (HSP).

A HSP, pode ser entendida como o valor de energia solar acumulada ao longo de um dia, ou seja, serve para indicar a quantidade de horas/dia que a radiação solar deveria se manter igual a $1000\text{W}/\text{m}^2$ (PINHO; GALDINO, 2014).

Para se obter esses valores de HSP em um dado local é necessário fazer medições constantes durante longos períodos de tempo (meses ou anos) por meio de equipamento de medição, no entanto, pelo fato da demora na aquisição dos dados de maneira satisfatória, o que dificulta o desenvolvimento do projeto e aplicação SFV, houve a necessidade de aprimorar estudos utilizando técnicas cada vez mais avançadas como correlação de dados de números de horas de insolação, até mesmo análise avançada de irradiância por satélite além de dados técnicos utilizando sistemas computacionais para a elaboração de mapas solarimétricos para dar mais rapidez e precisão na aquisição desses dados para elaboração de projetos com a geração de energia solar fotovoltaica (SILVA JUNIOR, 2017).

Partindo desse princípio, o Atlas Solarimétricos do Brasil além da plataforma online Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), serão usados como base para a obtenção dados solarimétricos da região a qual o estudo se destina (CRESESB, 2014). O atlas solarimétricos do Brasil, apresenta várias informações no que se refere aos dados solarimétricos de cada estado brasileiro como por exemplo, insolação diária média anual e insolação diária média mensal, informações consistentes, obtidas através de estações de monitoramento climático e armazenamento de dados solarimétricos de cada região.

Figura 13 - Atlas Solarimétrico do Maranhão, insolação diária, média anual (horas).



Fonte: adaptado, TIBA, et al (2000).

A plataforma online de aquisição de dados solarimétricos do CRESESB trabalha de forma mais precisa, pois a plataforma coleta seus dados online diretamente das unidades de monitoramento climáticos o que por sua vez permite a pesquisa de dados solarimétricos por meio de coordenadas geográficas de região de interesse, além de permitir a verificação dos dados históricos e estatísticos de uma certa região, a plataforma também disponibiliza dados solarimétricos em relação ao plano horizontal e o plano inclinado para averiguar qual plano possui uma maior eficiência e portanto apresenta um maior potencial na produção energética.

Então, de posse desses dados é possível determinar para uma região qualquer o HSP diário, fator esse de extrema importância para estudo da viabilidade técnica de implantação de um SFV em um dado local.

3.2.1 Localização e tipo de configuração do SFV

É muito importante a determinação do fator localização de montagem do SFV, pois influencia diretamente na eficiência e rendimento do sistema instalado. Locais onde o índice de sombreamento, seja por vegetação ou infraestrutura vizinha são considerados altos, os mesmos podem prejudicar de forma significativa o desempenho máximo do SFV o que acarreta em

déficit no fornecimento energético demandado. Pelas características da circunvizinhança do prédio do CCAA, o mesmo apresenta apenas vegetação de pequeno e médio porte, com recuo de 10,00 a 20,00 metros da estrutura predial que não interfere possível perda de eficiência por sombreamento.

Quanto ao tipo de configuração do SFV, os dois modelos, Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) e o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), serão avaliados do ponto de vista técnico e financeiro para determinar qual sistema se adequa melhor a essas condições. O Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) ou também conhecido como Off-Grid, por sua principal característica que é a geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos de forma independente, esse tipo de sistema possui algumas limitações. Sendo que há um aumento considerável no valor de investimento para a implantação desse sistema, pois faz-se necessário o uso de um sistema de armazenamento (banco de baterias) de energia elétrica gerada para uso durante a noite, maiores gastos com manutenção do sistema. Esse sistema é aplicado muito em locais mais remotos onde não possui nas suas proximidades rede elétrica pública. Outra limitação desse tipo de sistema é pelo fato de o mesmo pode não conseguir suprir a demanda energética do local onde será implantado.

O Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) apresenta investimento menor em relação ao sistema SFI, pois demanda de menos equipamentos, montagem mais facilitada, tem um baixo custo de manutenção, pois grande parte dos equipamentos são projetados para durarem mais de 25 anos, sem nenhum tipo de intervenção. Eventualmente os painéis acumulam sujeiras e detritos que podem levar à diminuição de sua performance de forma que apenas uma simples limpeza anual dos painéis pode resolver o problema garantindo assim, a eficiência do sistema. Outro ponto positivo desse sistema é que ele trabalha com o conceito de compensação, ou seja, se durante o dia o sistema está gerando mais energia do que o próprio consumo, em tempo real ela é injetada na rede elétrica, tendo assim um abatimento ainda maior no valor da fatura de pagamento.

Partindo dessas informações, a configuração do SFV será do tipo SFCR, pois o mesmo apresenta um custo de implantação mais reduzido em relação ao SFI, que apresenta uma demanda maior por equipamentos, mão de obra e manutenção periódica, também tem a possibilidade de não atender a carga demandada.

A seguir, serão apresentadas as formas de levantamento da demanda energética, que irá impactar diretamente no dimensionamento do sistema SFCR como um todo, no que diz respeito ao dimensionamento do gerador fotovoltaico, dimensionamento do inversor de carga,

dimensionamento do quantitativo de módulos fotovoltaicos a serem usados no projeto, dimensionamento das instalações elétricas para corrente contínua (c.c) e corrente alternadas (c.a) e por fim, o dimensionamento dos dispositivos de segurança necessários de acordo com as normas vigente para projetos elétricos como a NBR-5410:2008 – Instalações elétricas de baixa tensão e NBR 11704:2008 – Sistemas fotovoltaicos – Classificação.

3.2.2 Demanda e consumo elétrico

Para que se possa determinar a demanda e o consumo elétrico de uma unidade consumidora, existem dois métodos para a obtenção desses resultados. O primeiro método é quando a unidade consumidora ainda não existe um consumo, pois faz-se a soma do consumo energético de cada equipamento que dependerá da potência dos mesmo que serão utilizados na unidade, juntamente com o tempo de utilização dos mesmos durante o mês, para que se tenha a chamada “média mensal de consumo”. Método este bem mais trabalhoso, mas que se faz necessário inicialmente para se determinar a demanda energética.

Já o segundo método é bem mais rápido, uma vez que, se tenha instalado na unidade consumidora os equipamentos, nesse caso já há uma demanda elétrica, pois é através histórico de consumo da unidade consumidora (conta de energia), fornecida pela concessionária fornecedora de energia elétrica, onde constam o consumo médio mensal, juntamente com informações de preço por Kw/h, tipo de tarifas, entre outros que não serão abordados por não fazer parte do foco deste trabalho.

3.2.3 Dimensionamento do gerador FV

O dimensionamento do gerador fotovoltaico (FV), é um dos primeiros passos para a implantação de um SFCR, o mesmo é um fator que influencia diretamente no processo de geração de energia e sua eficiência energética. Os principais fatores responsáveis para um bom dimensionamento do gerador FV são o índice de irradiação solar no qual será aplicado ao SFV, e a tecnologia aplicada no módulo fotovoltaico, pois ele determinará a sua Taxa de Desempenho (TD), que também são influenciados pelas tecnologias empregadas no tipo de cabeamento elétrico do sistema em c.c, e em c.a, no que concerne as suas perdas, além da eficiência do inversor de carga e todo o conjunto de equipamentos responsáveis pelo funcionamento pleno do SFCR que são de fundamental importâncias para o ótimo desempenho dos sistema. Conforme a equação 1, é demonstrado a determinação da Potência de Pico do Módulo Fotovoltaico PP_{MFV} , necessário para o dimensionamento do gerador FV.

$$PP_{MFV} = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}} \quad (1)$$

Onde:

PP_{MFV} (kWp) – Potência de pico do gerador FV;

E (kW/h) – Consumo diário médio anual de energia elétrica da edificação;

TD (%) – Taxa de desempenho;

HSP_{MA} (h) – Média diária anual das HSP incidente no plano do módulo FV.

3.2.4 Dimensionamento da quantidade de módulos FV

Mediante a determinação da PP_{MFV} do gerador fotovoltaico, faz-se necessário o dimensionamento da quantidade de módulos fotovoltaico para que possa suprir a demanda energética. A equação 2 demonstra a forma de se determinar o número de módulos FVs (N_p) que serão necessários para fornecer a carga energética para abastecer um dado empreendimento com uma demanda já estabelecida.

$$N_p = \frac{PP_{MFV}}{P_{MOD}} \quad (2)$$

Onde:

N_p (unidade) – Números de módulos da instalação do SFV;

PP_{MFV} (Wp) – Potência de pico do gerador FV;

P_{MOD} (Wp) – Potência de pico máxima do módulo FV.

3.2.5 Dimensionamento do inversor de carga de c.c em c.a

Um dos equipamentos essenciais para o funcionamento pleno do SFCR, é o inversor de carga, também conhecido como “equipamento de condicionamento de potência”. A energia gerada pelos módulos FVs é em corrente contínua (c.c), já a corrente fornecida pela concessionária pública de eletricidade e que também é o mesmo tipo de corrente onde operam os equipamentos eletrônicos é em corrente alternada (c.a.), tendo em vista isso o inversor de carga tem como principal função converter a c.c em c.a, para garantir a operação do sistema de forma eficiente, permitindo que o inversor trabalhe de forma estável na sua potência nominal, ou seja, nem abaixo e nem sobrecarregado o sistema.

É importante destacar também que pelo próprio fato natural da irradiação solar sofrer variações ao longo do dia pela mudança de ângulo do plano, ou também por variações climáticas, a geração de energia elétrica pelos módulos FVs também sofrem variações, e nesse contexto, os inversores com tecnologia mais avançada trabalham juntamente com dispositivos de segurança para diminuir possíveis problemas relacionado a essas variações de carga, e são denominado como “Seguimento do Ponto de Potência Máxima” (SPPM). Assim como para o dimensionamento do gerador FV, para o dimensionamento do inversor de carga, deve-se obedecer, alguns requisitos e fatores como:

- Potência nominal (P_{Nca}) em c.a. do inversor de carga;
- Potência pico (PP_{MFV}) do gerador FV;
- Máxima e mínima tensão ($V_{iSPPMmáx}$ e $V_{iSPPMmín}$) em c.c de operação do SPPM do inversor de carga;
- Tensão de potência máxima ($V_{mpTmáx}$ e $V_{mpTmín}$) de um módulo FV na menor e na maior temperatura de operação prevista;
- Corrente máxima ($I_{imáx}$) na entrada do inversor em c.c. e corrente de curto-circuito (I_{sc}) em c.c. do módulo FV.

Através dessas informações em mãos e que são fornecidas pelos fabricantes nas fichas técnicas dos inversores, pode-se prosseguir com os cálculos de dimensionamento do inversor de carga. Porém são necessários que se determine também outros fatores de extrema importância para dimensionamento do inversor de carga como o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI), tensão de entrada de operação do SPPM do inversor e a corrente máxima em c.c do inversor.

a) Fator de dimensionamento do inversor de carga (FDI)

Este é um dado muito importante dentro do processo de dimensionamento do inversor de carga, pois o mesmo procura uma forma de determinar uma relação entre a potência de pico do gerador PP_{MFV} e a potência nominal em c.a do inversor (P_{Nca}) para que o sistema tenha um melhor custo benefício, geralmente os valores de FDI ficam entre 0,75-0,85, em seu limite inferior e 1,05 para o superior, sendo esse valor adimensional. A equação 3 mostra como se procede o cálculo para a determinação do FDI.

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{N_{MCI} * P_{MOD}(Wp)} \quad (3)$$

Onde:

FDI – Fator de dimensionamento do inversor de carga (adimensional);

$P_{Nca}(W)$ – Potência nominal em corrente alternada do inversor de carga;

$P_{MOD}(Wp)$ – Potência de pico máxima do módulo FV;

N_{MCI} – Número de módulos para cada inversor de carga.

b) Tensão de entrada e faixa de tensão de operação do SPPM do inversor de carga

Para que se possa garantir as condições desejáveis de operação do sistema é de grande importância que se determine a tensão de entrada, que nada mais é do que a somatória de todas as tensões geradas pelos módulos FVs com suas associações em série. Como já foi abordado anteriormente, a tensão gerada pelos módulos FVs sofre variação em decorrência da variação da radiação solar, mas mesmo havendo essas variações, é necessário que as tensões geradas estejam dentro do aceitável para o pleno funcionamento do sistema. Com isso a equação 4 e equação 5 são usadas para que se possa determinar essa condição.

$$N^{\circ} \text{módulos}_{\text{série}} * V_{ocTmín} < V_{imáx} \quad (4)$$

Onde:

$V_{imáx}(V)$ – Máxima tensão c.c admitida pela entrada do inversor de carga;

$V_{ocTmín}(V)$ – Tensão em circuito aberto (V_{oc}) de um módulo FV em menores temperaturas de operação.

$$\frac{V_{iSPPMmín}}{V_{mpTmáx}} < N^{\circ} \text{módulos}_{\text{série}} < \frac{V_{iSPPMmáx}}{V_{mpTmíx}} \quad (5)$$

Onde:

$V_{iSPPMmín}(V)$ – Tensão mínima em c.c. de operação do SPPM do inversor;

$V_{iSPPMmáx}(V)$ – Tensão máxima em c.c. de operação do SPPM do inversor;

$V_{mpTmín}$ (V) – Tensão de potência máxima (V_{mp}) de um módulo FV em menores temperaturas de operação;

$V_{mpTmáx}$ (V) – Tensão de potência máxima (V_{mp}) de um módulo FV em maiores temperaturas de operação.

c) Corrente máxima c.c. do inversor de carga

A determinação da corrente máxima em c.c do inversor de carga é importante pelo fato de que através dela é que se pode arranjar os módulos FVs em paralelo ou série e quantidade do número máximo de fileiras de módulos FVs de forma a respeitar o limite máximo das somas das correntes c.c para que não prejudique o desempenho do sistema como mostra a equação 6 a seguir.

$$N^{\circ} \text{sériesFV_paralelo} = \frac{I_{i\text{máx}}}{I_{sc}} \quad (6)$$

Onde:

$I_{i\text{máx}}$ (A) – Máxima corrente c.c admitida na entrada do inversor;

I_{sc} (A) – Corrente de curto circuito do módulo FV.

3.2.6 Dimensionamento das instalações elétricas para corrente contínua (c.c) e corrente alternada (c.a)

Outro parâmetro muito importante de um projeto elétrico e para o bom funcionamento do mesmo, é o correto dimensionamento das instalações elétricas com a seção de cabos, baseado no comprimento dos ramais e acorrente, tensão nominal, além de outros fatores como o nível de perdas pretendido. Seu dimensionamento é definido pela ABNT, mais especificamente pela norma, NBR 5410/2008 – Instalações elétricas de baixa tensão.

São parâmetros usados como forma de deixar o sistema mais consistente e seguro, uma vez que o sistema será dimensionado para c.c e em c.a. As instalações em c.c, não são muito convencionais, requerendo uma atenção maior, pois operam em altas tensões e temperaturas, como no caso dos módulos FVs. Já as instalações em c.a são as que vêm do inversor de carga até a ligação à rede elétrica de distribuição serão obedecidas a norma

NBR510/2008. A equação 7 demonstra como se determina o dimensionamento das seções dos cabos usados para c.c já que não são muito usuais em projeto elétricas convencionais.

$$S_c(\text{mm}^2) = \rho \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \cdot \frac{d(\text{m}) \cdot I(\text{A})}{\Delta V(\text{V})} \quad (7)$$

Onde:

S_c – Seção do cabeamento (mm^2);

ρ – Resistividade do material;

d – Distância do condutor (trecho de ida e volta);

I – Corrente que passa pelo material condutor;

ΔV – Variação da tensão admissível no cabeamento.

3.2.7 Dimensionamento dos dispositivos de segurança

O dimensionamento dos dispositivos de segurança de um SFV, são de grande importância para manter a integridade dos equipamentos, assim como o pleno funcionamento do sistema, esses dispositivos são usados basicamente por conta variação de potência, tendo em vista que a geração de energia não é uniforme. Esses dispositivos são itens necessários para todos os projetos envolvendo eletricidade de baixa tensão como os disjuntores, varistores, aterramento, dispositivos contra surto (DPS) e proteção contra descargas atmosféricas (para-raio), se resumindo-se em fusíveis, diodos de desvio e diodos de bloqueio. Todos necessário para o pleno funcionamento do SFV.

A geração de energia pelo módulos FVs de forma não uniforme pode se dar pelo fato de haver sombreamento de uma das células FV e seu efeito se propaga pelas demais células dos módulos conectados em série, no entanto, as células não sombreadas geram mais energia que as sombreadas e por esse motivo os dispositivos de proteção entram em ação para dissipar essa energia e não provocar danos nos módulos geradores.

Para que não haja a dissipação de energia sob a forma de calor nos módulos, os diodos de desvio começam agir como forma de proteção do sistema. Já os fusíveis e diodos de bloqueio são usados como forma de proteção dos agrupamentos dos módulos evitando-se o fluxo de tensões elevadas de módulos para outros com baixas tensões.

Os acervos técnicos, apresentam os fusíveis como os melhores dispositivos como de proteção quando comparado com os diodos de bloqueio e de desvio. Segundo a International

Electrotechnical Commission's (IEC), mais precisamente a IEC 60364, os fusíveis precisam atender algumas condições descritas a seguir mediante as equações 8 e 9 respectivamente.

$$1,1 \cdot I_{SC,STC} \leq I_{NF} \leq I_R \quad (8)$$

Onde:

$I_{SC,STC}$ (A) – Corrente de curto circuito das séries em paralelo nas condições de teste;

I_{NF} (A) – Corrente nominal do fusível;

I_R (A) – Corrente reversa suportada pelos módulos (especificado pelo fabricante).

$$1,35 \cdot I_{RM} \leq (N_{SP} - 1) \cdot I_{SC,STC} \quad (9)$$

Onde:

I_{RM} (A) – Corrente reversa máxima presente no circuito;

N_{SP} (A) – Número de séries ligados em paralelo;

$I_{SC,STC}$ (A) – Corrente de curto circuito das séries em paralelo nas condições de teste;

3.3 Indicadores de análise de viabilidade econômico-financeiro e retorno de investimento

Os indicadores de viabilidade econômico-financeiro e retorno de investimento podem ser de diferentes tipos dependendo das características do projeto. Portanto, como se deseja analisar a viabilidade econômico-financeiro de energia solar a análise payback que é termo usado para indicar o tempo de retorno de investimento em um determinado projeto, e ainda se divide em duas partes, indo desde de análise simples que não se consideradas certos fatores influentes como é o caso do payback simples (PBs), que considera apenas o capital inicial investido, até uma análise mais complexa como o caso do payback descontado (PB_D) que leva em consideração o dinheiro no tempo, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa Mínima de Atratividade (TMA), fatores esses indispensáveis para constatar a viabilidade econômica de investimento em um projeto.

Em relação a viabilidade técnica, devem ser considerados desde e os dados de irradiação solar da região até mesmo a eficiências dos componentes do SFGR, como os módulos FVs, inversores de carga, sombreamento dos painéis, demanda energética do local onde será

implantado o sistema. Nesse contexto, é ideal que se faça uma avaliação técnica do sistema, levando em consideração também a projeção da vida útil do sistema como um todo.

3.3.1 Payback simples

O payback simples é um dos métodos mais simples para analisar a viabilidade de um investimento, ou seja, é definido como o período (dias, meses, anos) para que se recupere um dado valor inicial investido, porém o mesmo não leva em conta o acompanhamento da cotação do dinheiro no tempo. Para se calcular o período de payback simples de um projeto, basta dividir o valor total de investimento pela soma dos valores dos fluxos de caixa arrecadado, período a período. O resultado é o período que a soma dos valores do fluxo de caixa se iguale ao valor inicial de investimento. A equação 10 mostra a fórmula do cálculo do payback simples.

$$PBs \text{ (anos)} = \frac{I_T \text{ (R\$)}}{E_A \text{ (R\$)}} \quad (10)$$

Onde:

PBs – Payback simples (ano);

I_T – Investimento total no SFV (R\$);

E_T – Economia total do SFV anualmente (R\$).

3.3.2 Payback descontado

Já o payback descontado é um método de análise de investimento mais complexo, pois o mesmo leva em consideração o dinheiro no tempo, utiliza uma taxa de desconto que é a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), para verificar o número exato de períodos em que o valor inicial de investimento no projeto será recuperado. A equação 11, mostra os principais fatores para o cálculo do payback descontado (PB_D).

$$PB_D = \frac{\ln\left(1 - \frac{I_T * i}{A}\right)}{\ln(1 + i)} \quad (11)$$

Onde:

PB_D – Payback descontado (ano);

I_T – Investimento total (R\$);

i – Taxa de juros (%);

A– Economia proporcionada (R\$).

3.3.3 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido, mais conhecido como VPL, é outro grande importante indicador de análise de viabilidade econômica, pois é a soma de todos os valores presentes de todos os fluxos de caixa previsto no negócio, pois leva em consideração o dinheiro no tempo, ou seja, traz para o valor presente os fluxos de caixa de um investimento para que se possa determinar se o mesmo é viável ou não. Em outras palavras e a diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa associadas ao projeto e o investimento inicial necessário aplicados a uma taxa de juros anual. Outro fator importante a ser destacado dentro do cálculo do VPL é a taxa mínima de atratividade (TMA), que nada mais é do que uma taxa de desconto utilizada para representar um valor mínimo que um determinado investimento deve obter. A equação 12 demonstra como se procede o cálculo do VPL.

$$VPL = FC_0 + \sum \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n}$$

Onde:

VPL – Valor presente líquido;

FC_0 – Fluxo de caixa no prazo zero;

FC_n – Fluxo de caixa em um determinado período (n)

TMA – Taxa mínima de atratividade.

(12)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, serão apresentadas as e estabelecidas as etapas e condições para o dimensionamento do SFCR, através das condições e recursos solares da região, parâmetros técnicos envolvendo os equipamento, além da melhor forma de dimensionar esse sistema, levantamento de demanda energética, análise do histórico de consumo do local em estudo. Também serão apresentados os resultados do dimensionamento do sistema e resultados da análise de viabilidade técnica-financeira de implantação do SFV.

4.1 Levantamento dos dados solarimétricos

Os dados solarimétricos usados neste estudo foram adquiridos através da plataforma online CRESESB – CEPEL, que utiliza estações de monitoramento de irradiação solar de forma constante durante todo o ano, obtendo valores médios mensais que são apresentados em forma de gráficos e tabelas onde pode-se observa seus maiores e menores picos de irradiação solar de acordo com seus planos de inclinação e período do ano.

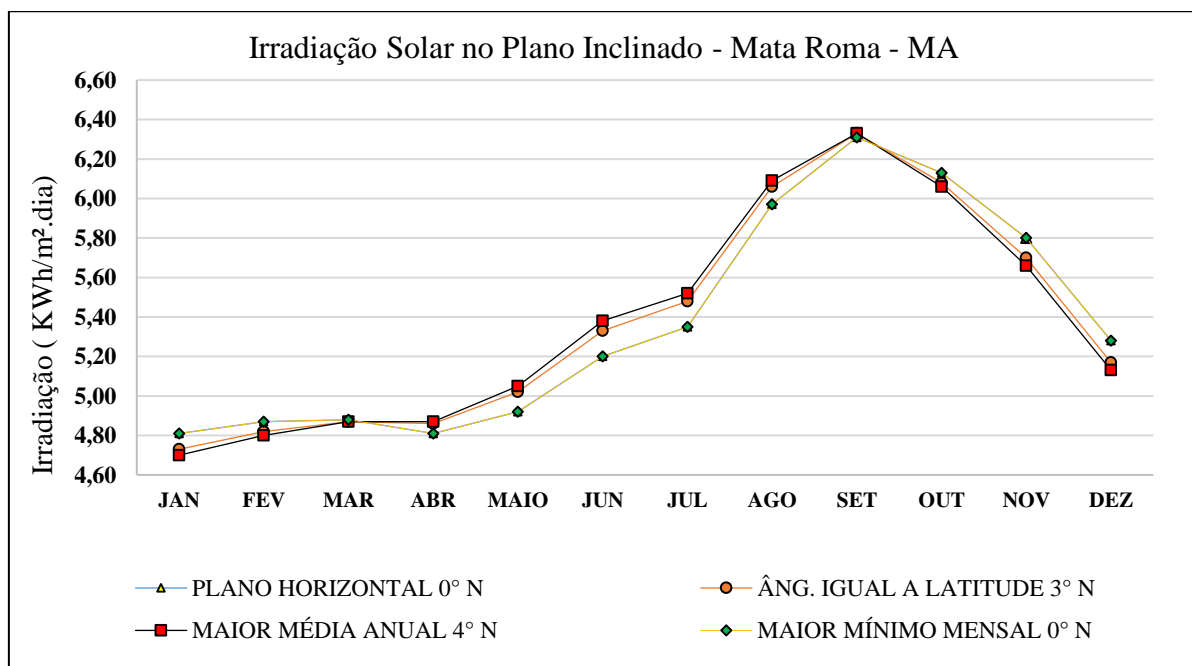
Como forma de dar mais consistência aos dados e ao mesmo tempo observar o potencial solarimétrico da região, cinco cidades, Mata Roma, Anapurus, Chapadinha, São Benedito do Rio Preto e Vargem Grande, todas com estações de monitoramento foram escolhidas para representar seus dados. Sendo que a principal delas é Chapadinha – MA, onde se encontra o Centro de Ciências Agrárias e Ambientais e que será aplicado o estudo. Em seguida, serão apresentados os dados solarimétricos em forma de tabelas e gráficos das cinco cidades apresentadas anteriormente.

Tabela 7 - Dados solarimétricos - Mata Roma-MA.

Estação: Mata Roma-MA / Latitude: 3,701° S / Longitude: 43,149°															
ÂNGULO	INC.	IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL (kWh/m ² .dia)												MÉDIA	DELTA
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
PLANO HORIZONTAL	0° N	5,20	5,30	5,25	5,13	5,04	5,22	5,39	5,95	6,30	6,26	6,01	5,56	5,55	1,27
ÂNG. IGUAL A LATITUDE	4° N	5,07	5,22	5,24	5,19	5,17	5,40	5,56	6,08	6,33	6,18	5,86	5,40	5,56	1,26
MAIOR MÉDIA ANUAL	4° N	5,07	5,22	5,24	5,19	5,17	5,40	5,56	6,08	6,33	6,18	5,86	5,40	5,56	1,26
MAIOR MÍNIMO MENSAL	2° N	5,14	5,26	5,25	5,16	5,11	5,31	5,48	6,02	6,32	6,22	5,94	5,48	5,56	1,21

Fonte: CRESESB (2019).

Gráfico 3 - Dados solarimétricos - Mata Roma-MA.



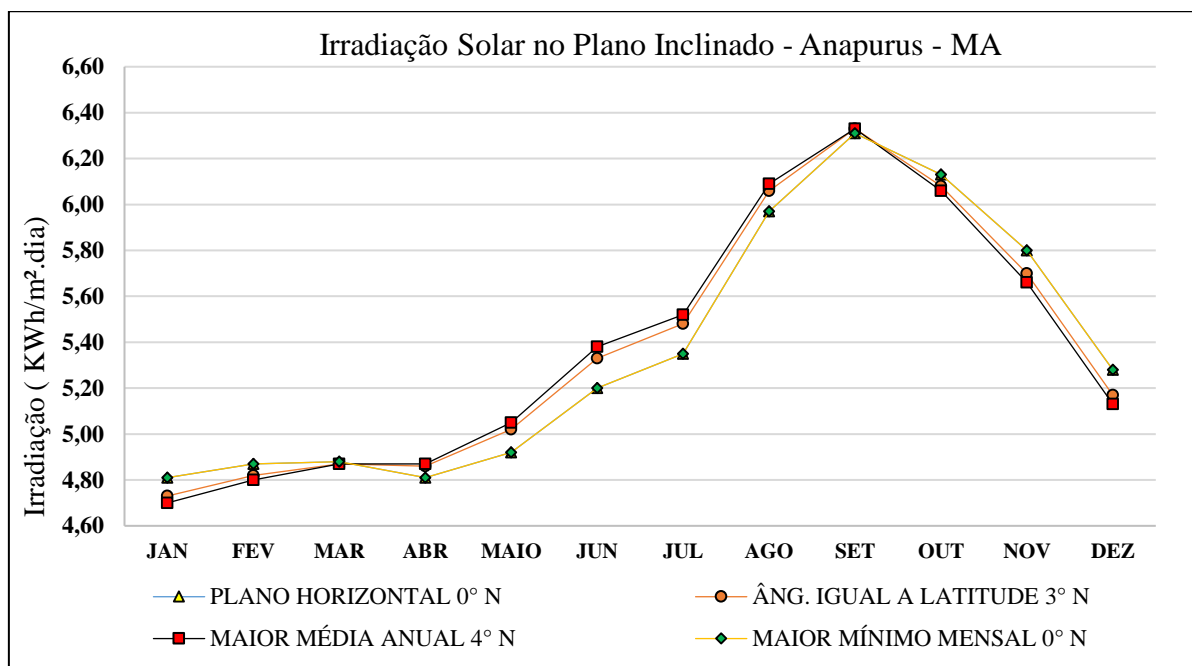
Fonte: Autor (2019).

Tabela 8 - Dados solarimétricos - Anapurus-MA.

Estação: Anapurus-MA / Latitude: 3,701° S / Longitude: 43,049°																
ÂNGULO	INC.	IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL (kWh/m².dia)												MÉDIA	DELTA	
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ			
PLANO HORIZONTAL	0° N	5,20	5,29	5,29	5,12	5,03	5,21	5,35	5,90	6,25	6,23	6,01	5,57	5,54	1,22	
ÂNG. IGUAL A LATITUDE	4° N	5,07	5,21	5,28	5,18	5,16	5,39	5,52	6,02	6,28	6,16	5,87	5,41	5,55	1,21	
MAIOR MÉDIA ANUAL	4° N	5,07	5,21	5,28	5,18	5,16	5,39	5,52	6,02	6,28	6,16	5,87	5,41	5,55	1,21	
MAIOR MÍNIMO MENSAL	3° N	5,10	5,23	5,28	5,17	5,13	5,35	5,48	5,99	6,27	6,18	5,90	5,45	5,55	1,17	

Fonte: CRESESB (2019).

Gráfico 4 - Dados solarimétricos - Anapurus-MA.



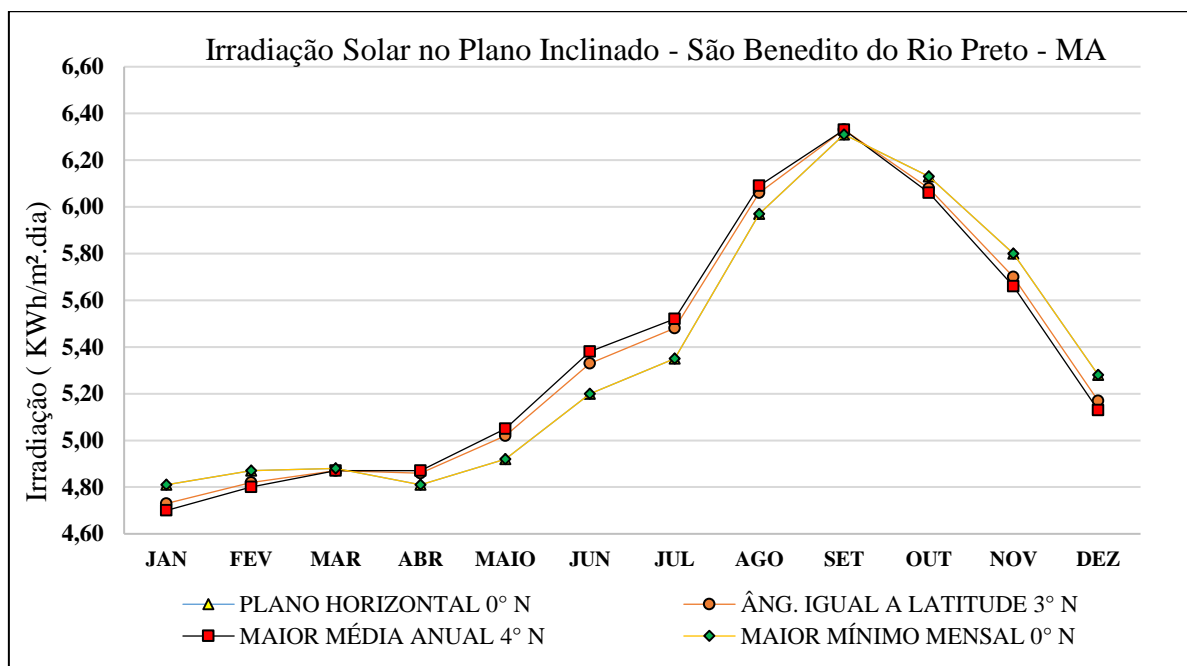
Fonte: Autor (2019).

Tabela 9 - Dados solarimétricos - São Benedito do Rio Preto-MA

Estação: São Benedito do Rio Preto-MA / Latitude: 3,301° S / Longitude: 43,549°															
ÂNGULO	INC.	IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL (kWh/m².dia)												MÉDIA	DELTA
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
PLANO HORIZONTAL	0° N	4,81	4,87	4,88	4,81	4,92	5,20	5,35	5,97	6,31	6,13	5,80	5,28	5,36	1,50
ÂNG. IGUAL A LATITUDE	3° N	4,73	4,82	4,87	4,86	5,02	5,33	5,48	6,06	6,33	6,08	5,70	5,17	5,37	1,60
MAIOR MÉDIA ANUAL	4° N	4,70	4,80	4,87	4,87	5,05	5,38	5,52	6,09	6,33	6,06	5,66	5,13	5,37	1,64
MAIOR MÍNIMO MENSAL	0° N	4,81	4,87	4,88	4,81	4,92	5,20	5,35	5,97	6,31	6,13	5,80	5,28	5,36	1,50

Fonte: CRESESB (2019).

Gráfico 5 - Dados solarimétricos - São Benedito do Rio Preto-MA



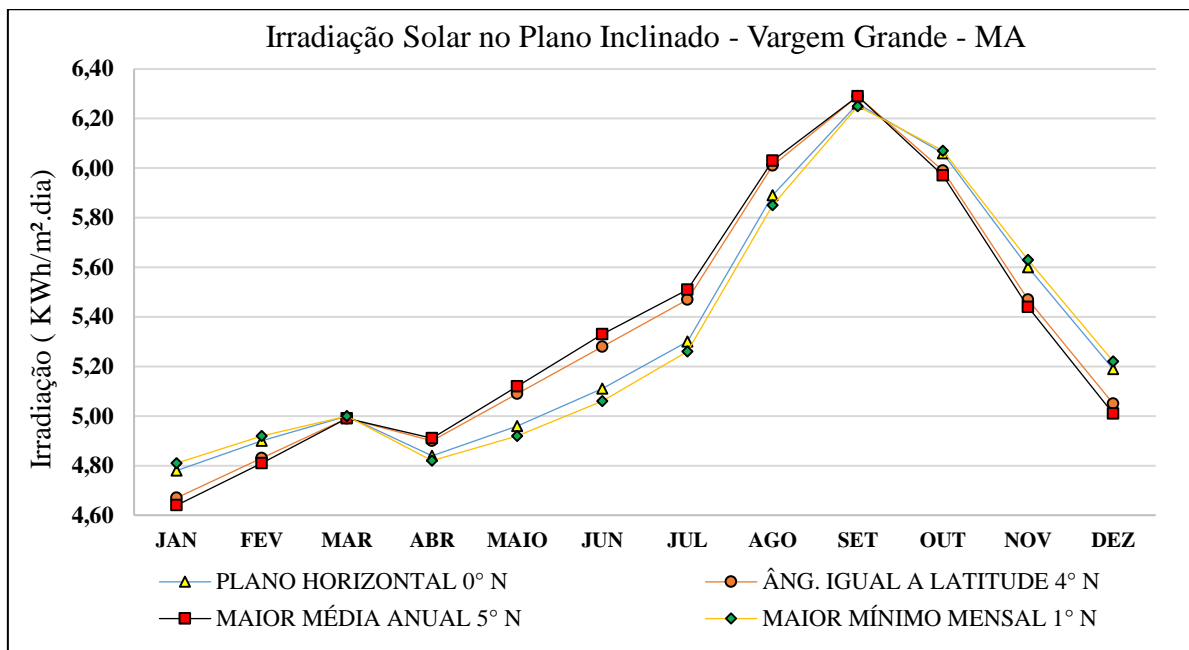
Fonte: Autor (2019).

Tabela 10 - Dados solarimétricos - Vargem Grande-MA.

Estação: Vargem Grande-MA / Latitude: 3,501° S / Longitude: 43,949°															
ÂNGULO	INC.	IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL (kWh/m².dia)												MÉDIA	DELTA
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
PLANO HORIZONTAL	0° N	4,78	4,90	5,00	4,84	4,96	5,11	5,30	5,89	6,26	6,06	5,60	5,19	5,32	1,48
ÂNG. IGUAL A LATITUDE	4° N	4,67	4,83	4,99	4,90	5,09	5,28	5,47	6,01	6,29	5,99	5,47	5,05	5,34	1,62
MAIOR MÉDIA ANUAL	5° N	4,64	4,81	4,99	4,91	5,12	5,33	5,51	6,03	6,29	5,97	5,44	5,01	5,34	1,65
MAIOR MÍNIMO MENSAL	1° N	4,81	4,92	5,00	4,82	4,92	5,06	5,26	5,85	6,25	6,07	5,63	5,22	5,32	1,45

Fonte: CRESESB (2019).

Gráfico 6 - Dados solarimétricos - Vargem Grande-MA.



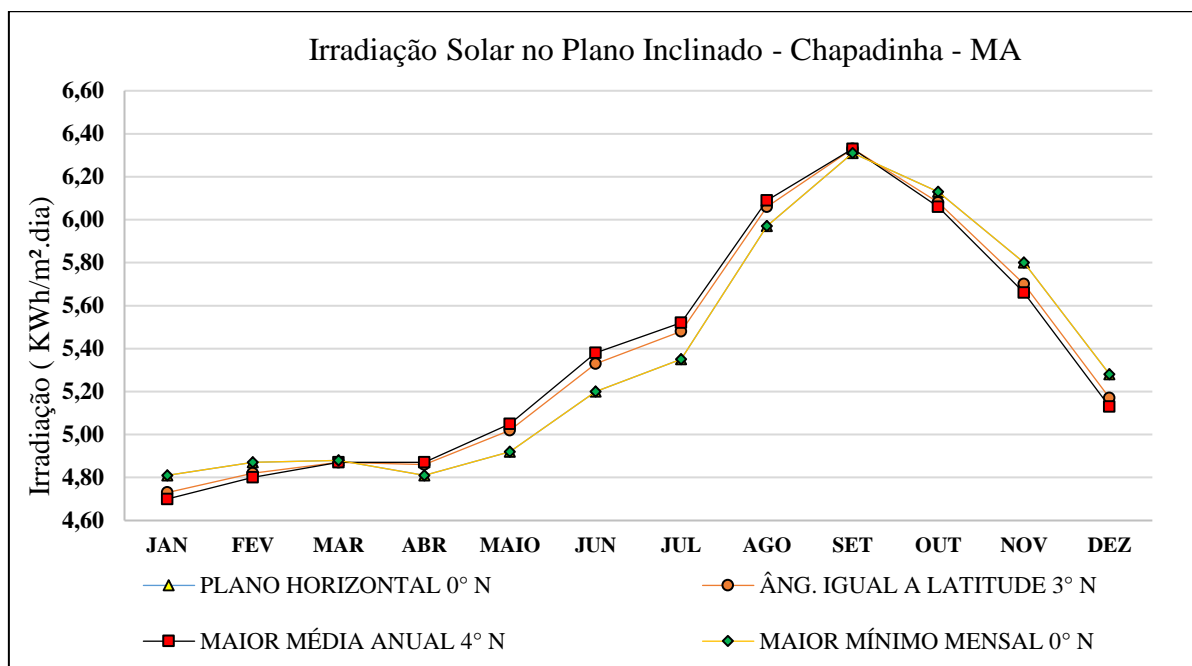
Fonte: Autor (2019).

Tabela 11 - Dados solarimétricos - Chapadinha-MA.

Estação: Chapadinha-MA / Latitude: 3,701° S / Longitude: 43,349°															
ÂNGULO	INC.	IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL (kWh/m².dia)												MÉDIA	DELTA
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
PLANO HORIZONTAL	0° N	5,02	5,16	5,21	5,03	4,97	5,18	5,45	5,97	6,36	6,28	5,95	5,50	5,51	1,40
ÂNG. IGUAL A LATITUDE	4° N	4,90	5,08	5,20	5,10	5,10	5,36	5,63	6,09	6,39	6,20	5,81	5,34	5,52	1,49
MAIOR MÉDIA ANUAL	4° N	4,90	5,08	5,20	5,10	5,10	5,36	5,63	6,09	6,39	6,20	5,81	5,34	5,52	1,49
MAIOR MÍNIMO MENSAL	1° N	4,99	5,14	5,21	5,05	5,00	5,23	5,50	6,00	6,37	6,26	5,92	5,46	5,51	1,38

Fonte: CRESESB (2019).

Gráfico 7 - Dados solarimétricos - Chapadinha-MA.



Fonte: Autor (2019).

De acordo com os dados de irradiação solar apresentados nas tabelas e gráficos, é possível observar os valores médios mensais e anuais da irradiação solar em cada uma das cinco cidades apresentadas, juntamente com seus picos maiores e menores de irradiação, além da visível variação dos valores de irradiação como mudança na inclinação.

Como é facilmente perceptível, as variações médias entre as cidades são bem tímidas, tendo em vista que pelo fato de serem próximas umas das outras e estarem geograficamente próximas a linhas do equador, não apresentam grandes variações em sua irradiação solar.

De acordo com os dados da tabela 11, Chapadinha apresenta uma boa irradiação solar, e tem naturalmente suas variações ao longo do ano, tendo seus menores picos de irradiação no mês de janeiro, cerca de 4,90 KWh/m².dia, para um ângulo de inclinação de 4°N, por ser época chuvosa e com maior concentração de nuvens. E maiores picos de irradiação solar no mês de setembro, com valores de 6,39 KWh/m².dia, também para um ângulo de inclinação de 4°N, tendo como maior média anual 5,52 KWh/m².dia.

4.2 Localização e tipo de configuração do sistema

Quanto ao local de montagem dos módulos FVs, este será feito de acordo com a disponibilidade de espaço no local onde será implantado o sistema. Como já mencionado em

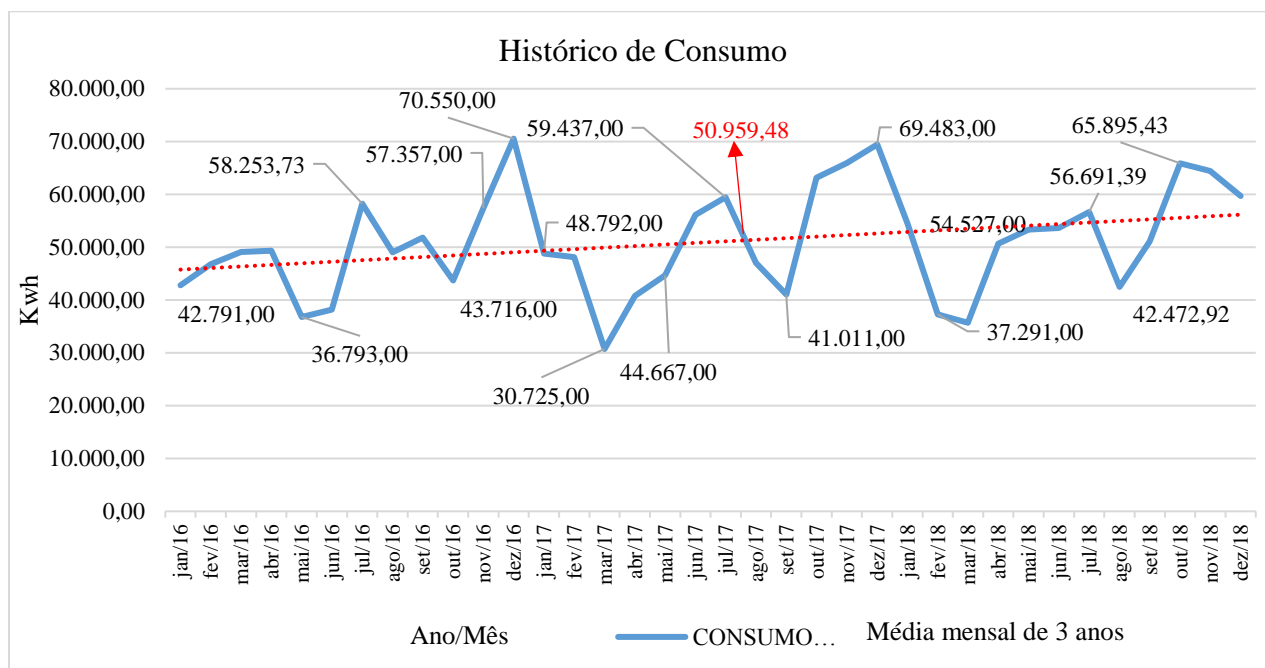
capítulos anteriores, o prédio do CCAA, em sua parte superior (laje de cobertura) disponibiliza uma área útil de 1.702,50 m² onde grande parte dos módulos possam ser montados, isolado de edificações próximas, além de não possui árvores de grande porte em suas redondezas que possa interferir na irradiação solar direta nas placas solares.

Em relação ao tipo de configuração do sistema que será adotado, vale destacara os dois sistemas adotado e enfatizados em capítulos anteriores, que são, o Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) e o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), ambos com suas características e peculiaridades, porém, optou-se por escolher o SFCR, pois o SFI se torna um sistema que requer um valor muito maior de investimento por conta do banco de baterias para armazenar a energia gerada, equipamentos adicionais, constantes manutenções e pelo mesmo talvez não conseguir suprir a demanda energética entre outros. Por tanto, o sistema a ser adotado nesse trabalho será o SFCR, pelo seu menor custo de investimento em relação ao SFI.

4.2 Demanda e consumo elétrico do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA)

O Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), construído há mais de dez anos, se localiza às margens da BR 222, há aproximadamente 4,70 km do centro da cidade de Chapadinha – MA. Sua demanda energética é suprida pela empresa fornecedora de eletricidade do estado, a Companhia Energética do Maranhão (CEMAR). Foram levantados dados de três anos de consumo elétrico do CCAA, tendo início em janeiro de 2016 à dezembro de 2018, por meio das faturas de consumo detalhado, fornecidos pela própria empresa, com o intuito de analisar o consumo como um todo da instituição, assim como sua variação ao longo dos meses e dos anos, assim também como possíveis aumentos ou tendências ao longo desses três anos analisados. O gráfico 8 mostra o histórico de consumo do CCAA.

Gráfico 8 - Histórico de consumo - Centro de Ciências Agrárias e Ambientas (CCAA).



Fonte: Autor (2019).

Através de uma análise no gráfico 8 é possível observar além de um grande consumo, também é possível analisar uma grande variação desse consumo, tendo seus menores picos no ano de 2016 nos meses de maio, junho e outubro, e maiores picos nos meses de julho, novembro e dezembro. No ano de 2017 seus menores picos de consumo foram nos meses de março, abril e setembro, e maiores picos nos meses de julho, outubro, novembro e dezembro. Em 2018, seus menores de picos de consumo foram nos meses de fevereiro, março e agosto, e seus maiores picos de consumo forma nos meses de julho, outubro, novembro e dezembro.

Esses aumentos e diminuições nos picos de consumo de energia elétrica pode ser atribuído a dois fatores principais, a diminuição se dá em períodos de férias no início e meio do ano, onde nessas datas também ocorre o período chuvoso, e nos meses mais ao final do ano quando a temperatura fica mais elevada, é quando geralmente para o período chuvoso, aumentando assim o consumo elétrico devido ao maior uso de equipamentos que requerem uma grande quantidade de energia como ar-condicionado por exemplo, para amenizar a temperatura em salas de aula e proporcionar um melhor conforto térmico aos estudantes.

Diante dessas informações, será estabelecida uma média de consumo dos três anos analisados aqui neste trabalho, o que corresponde de janeiro de 2016 a dezembro de 2018. Com isso, temos um consumo médio nesses três anos de 50.959,48 KWh/mês ou 1.698,65 KWh/dia.

4.3 Dimensionamento do gerador FV

O dimensionamento do gerador FV nada mais é do que determinar o conjunto de módulos FVs necessário para que se possa atender a demanda energética onde será aplicado o projeto, que nesse caso será no CCAA. Com isso, o primeiro passo é determinar a potência de pico do módulo FV (PP_{MFV}) de acordo com a equação 1 anteriormente mostrada no capítulo 3.

Nessa equação, as principais variáveis já estão pré-estabelecidas como o consumo diário médio (E), determinado a partir da análise dos dados do histórico de consumo do CCAA, a horas de sol pleno média diária anual (HSP_{MA}) e a taxa de desempenho do módulo (TD) que pode ser atribuída por fatores como sujeira, perdas por aquecimento, cabeamento elétrico, entre outros. No entanto, essa taxa é determinada pelos fabricantes e já levam todos esses aspectos em consideração. Nesse contexto, é indicado que se use o limite superior de 0,8, onde o mesmo pode variar entre 0,7 a 0,8 segundo especificações do fabricante. Com isso temos a equação 1 para determinar a PP_{MFV} .

$$PP_{MFV} = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}}$$
$$PP_{MFV} = \frac{\left(\frac{1.698,65 \text{ KWh/dia}}{0.80}\right)}{5,52 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{dia.}}$$

$$PP_{MFV} = 384,66 \text{ kWp}$$

4.4 Dimensionamento da quantidade de módulos FVs

Depois de dimensionar a PP_{MFV} do sistema, é necessário determinar a quantidade de módulos FVs que serão necessários para gerar a carga energética que suprirá a demanda do CCAA. Pois essa determinação só é possível mediante aos dados de PP_{MFV} obtidos na equação 1, onde os mesmos irão se fazer necessário na equação 2, onde será calculada a quantidade de módulos FVs no projeto. Além dos dados de PP_{MFV} , também serão necessários outros dados técnicos que são obtidos na ficha técnica de cada painel FV disponibilizado pelo fabricante. Nesse contexto, a placa a ser utilizada é o modelo YL330P-35b (330,00Wp) da fabricante Yingli, onde constam suas principais especificações técnicas conforme a tabela 12.

Tabela 12 - Especificações técnicas do painel solar fotovoltaico YL330P-35b (330Wp).

Especificações técnicas YL330P-35b	
Fabricante	Yingli
Modelo	YL330P-35b
Potência Máxima (W)	330,00
Tensão de Máxima Potência (V)	37,30
Tensão de Ponto de Mínima Potência (V)	29,70
Corrente de Máxima Potência Im (A)	8,98
Tensão de Circuito Aberto V _{OC} (V)	45,70
Corrente de Curto Circuito I _{SC} (A)	9,37

Fonte: NEOSOLAR (2019).

$$N_P = \frac{PP_{MFV}}{P_{MOD}}$$

$$N_P = \frac{384,66 * 1000,00Wp}{330,00 Wp}$$

$$N_P = 1.165,50 \text{ Módulos}$$

Portanto, depois de determinado a quantidade de módulos FVs, e o mesmo ter sido um valor não inteiro, o ideal é que se use o um valor inteiro subsequente, no caso 1.166 módulos de 330 Wp, para garantir a demanda energética do local de aplicação do projeto.

4.5 Dimensionamento do inversor de carga c.c em c.a

Para o dimensionamento do inversor de carga de c.c. em c.a, três parâmetros devem ser levados em conta como mostrado em capítulos anteriores. Uma dela é definir a potência do inversor de carga baseado na PP_{MFV} que foi de 384,65 kWp, então serão usados 22 inversores de carga de 17,50 kWp.

Diante disso, o ideal é que se divida a quantidade de módulos FVs em partes iguais para cada módulo, de forma a equilibrar a carga no sistema. De acordo com isso, serão divididos 53 módulos para cada inversor, totalizando 1.166 módulos FVs, modelo YL330P-35b (330,00 kWp). O inversor de carga será o modelo Fronius Symo 17.5-3-M. De acordo com os fatores já

citados, segue o complemento através dos dados técnicos do inversor de carga descritos na tabela 13, dando sequência aos cálculos de dimensionamento.

Tabela 13 - Especificações técnicas do inversor de carga Fronius Symo 17.5-3-M.

Especificações Técnicas Fronius Symo 17.5-3-M	
Fabricante	Fronius
Modelo	Symo 17.5-3-M
ENTRADA EM C.C	
Tensão de Entrada (V)	200,00 – 1000,00
Mínima tensão c.c. de operação do SPPM do inversor (V)	200,00
Número de MPPT independentes	3,00
Quantidade de conexões CC	3,00 + 3,00
Máxima corrente de entrada (A)	33,00 / 27,00
Máxima conjunto corrente curto-circuito (A)	49,40 / 40,50
SAÍDA EM C.A	
Potência Nominal CA (W)	17.500,00
Potência de Saída Máxima (VA)	17.500,00
Corrente Nominal de Saída (A)	25,30
Ligação de Rede	3~ NPE 400,00/230, 30~ NPE 380/220
Gama de Frequência (Hz)	50,00 / 60,00
Distorção harmônica (%)	1,50
Fator de Potência	0-1 ind. / cap.
PROTEÇÕES	
Medição de isolamento CC	Sim
Sub Tensão	Sim
Sobre tensão	sim
Disjuntor CC	sim

Fonte: FRONIUSBRAZIL (2019), adaptado.

a) Fator de dimensionamento do inversor de carga (FDI)

A determinação do Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) é usado para analisar a relação entre a potência em c.a e potência em c.c que são geradas pelos módulos FVs de forma não uniforme, essa relação em outras palavras procura verificar qual o melhor custo benefício dos sistema, ou seja, mais eficiente e econômico. Como descrito em capítulos anteriores, seus limites inferiores e superiores são estabelecidos em torno de 0.75 e 1,05 respectivamente segundo determinação do fabricante.

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{N_{MCI} * P_{MOD}(Wp)}$$

$$FDI = \frac{17.500,00(W)}{(53,00 * 330,00)Wp}$$

$$FDI = 1,00$$

De acordo com os cálculos realizados, o inversor de carga escolhido está dentro dos limites de FDI, com isso, se prossegue com os cálculos.

b) Tensão de entrada e faixa de tensão de operação do SPPM do inversor de carga

A configuração dos módulos FVs deve respeitar um limite de tensão máxima além dos limites de estabelecidos nas configurações do inversor de carga, já que as configurações dos módulos serão feitas em séries onde as tensões são somadas. Diante isso, a configuração do inversor escolhido permite 3 entradas, e com isso e pela quantidade de módulos para cada inversor, conveniou-se estabelecer 18 módulos FVs para cada entrada, como mostras a seguir na equação 4 e equação 5.

$$N^{\circ} \text{módulos_série} * V_{ocTmín} < V_{Imáx}$$

$$18,00 * 45,70 \text{ V} < 1000,00 \text{ V}$$

$$822,60 \text{ V} < 1000,00 \text{ V}$$

$$\frac{V_{iSPPM\min}}{V_{mpT\max}} < N^{\circ}\text{módulos}_{\text{série}} < \frac{V_{iSPPM\max}}{V_{mpT\min}}$$

$$\frac{200,00}{29,70} < 18,00 < \frac{1000,00}{37,30}$$

$$6,73 < 18,00 < 26,81$$

De acordo com os cálculos realizados e as condições estabelecidas pela mesma, a configuração do sistema com 18 módulos FVs está dentro dos limites de configuração do inversor de carga. Portanto, agora é verificar se a corrente máxima do inversor de carga está dentro dos limites estabelecidas.

c) Corrente máxima c.c. do inversor de carga

Para a verificação da corrente máxima de um inversor de carga, é necessário que haja a configuração de associação de série dos módulos FVs, o que não existe nesse caso. Portanto, nesse caso a corrente apresenta apenas o seu valor unitário de cada módulo FV de 8,98A, respeitando dessa forma a corrente máxima de entrada estabelecida nas configurações do inversor de carga que é de 33,00A.

4.6 Dimensionamento das instalações elétricas para o SFV de c.c e para c.a

Para o dimensionamento das instalações elétricas, deve-se pensar no projeto em dois trechos, um em c.c que corresponde ao que é produzido pelos módulos FVs, e o outros é em c.a são os que vêm do inversor de carga até a ligação na rede elétrica de distribuição da concessionária. Um importante fator a ser considerado é o aumento da resistividade do material em consequência do aumento da temperatura, e também a perda de eficiência do sistema por efeito Joule. O cobre por exemplo, é um dos materiais mais usados no cabeamento de instalações elétricas, e também ganhar resistência com o aumento da temperatura, ele apresenta uma resistividade na ordem de $1,72 \times 10^{-2}$ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) a uma temperatura de $20,00^{\circ}\text{C}$. Portanto, para a sua utilização em temperaturas a $60,00^{\circ}\text{C}$, sua resistividade fica na ordem de $2,86 \times 10^{-1}$ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

A equação 7, demonstra como se dimensiona a seção do fio para a c.c de acordo com a recomendada pelo fabricante do módulo FV, já o dimensionamento da seção de cabeamento para a c.a, será seguido o recomendado pela empresa fornecedora de energia elétrica, a CEMAR.

$$S_c(\text{mm}^2) = \rho \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \cdot \frac{d(\text{m}) \cdot I(\text{A})}{\Delta V(\text{V})}$$

$$S_c(\text{mm}^2) = 2,86 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} * \frac{50,00(\text{m}) \cdot 8,89(\text{A})}{40,00(\text{V})}$$

$$S_c = 3.18 \text{ mm}^2$$

De acordo com os cálculos realizados para o dimensionamento da seção do fio, foi determinado uma seção mínima de 3,18 mm², no entanto, por questões de segurança, será utilizado a seção de 4,00 mm² de acordo com especificações técnicas do inversor para o caso de c.c. Já para a c.a, a seção a ser usada seguirá a tabela de seções mínimas dos fios condutores de acordo com a amperagem do sistema disponibilizadas pela CEMAR.

4.7 Dimensionamento dos dispositivos de segurança.

Para o dimensionamento dos dispositivos de segurança, que pela natureza e configuração dos módulos FVs, serão dimensionados os disjuntores e fusíveis que serão usados no projeto. Portanto, foi definido que para cada inversor de carga com corrente nominal de 25,3 A, terá um disjuntor termomagnético tripolar com curva B de 30 A, que segundo as normas de proteção NBR 5410 e NBR 5459 estabelecem que os disjuntores de curva B devem atuar para correntes de curto-circuito entre três e cinco vezes a corrente nominal.

Quanto aos fusíveis, os mesmos serão enquadrados de acordo com a equação 8, já que a equação 9 só é viável quando tem a existência de ligação de séries de módulos em paralelos. A equação 8 demonstra

$$1,10 \cdot I_{SC,STC} \leq I_{NF} \leq I_R$$

$$1,10 * 9,37 \leq 20,00 \leq 30,00$$

$$10,31 \leq 20,00 \leq 30,00$$

Segundos os cálculos realizados, o fusível de 20,00 A conforme especificação técnica do módulo, respeita os limites estabelecidos pela International Electrotechnical Commission's (IEC), mais precisamente em sua publicação IEC 60364.

4.8 Previsão de orçamento do projeto

A previsão do orçamento do projeto de implantação do SFV, leva em conta todos os itens utilizados até a sua finalização. Por meio do dimensionamento já realizado, gora é hora de fazer a listagem dos equipamentos necessários, com os seus respectivos valores unitário e multiplicados pela quantidade. Também vale ressaltar que, pela necessidade de determinar a manutenção anual dos módulos FVs, levando-se em consideração a vida útil dos módulos, todos esses fatores devem constar no orçamento. A tabela 14, descreve os equipamentos, assim como seus valores unitário e quantitativo.

Tabela 14 - Previsão de orçamento do projeto.

Quantidade	Descrição	Valor Unit. (R\$)	Valor (R\$)
22,00	Fronius Symo 17.5-3-M	24.990,00	549.780,00
1.166,00	Módulo Fotovoltaico YL330P-35b	956,34	1.115.092,44
1,00	Materiais Elétricos	50.805,02	50.805,02
292,00	Kit de montagem NeoSolar para laje até 4 módulos fotovoltaicos	492,28	143.745,76
1,00	Instalação	62.000,00	62.000,00
25,00	Duas manutenções anuais para (limpeza)	300,00	15.000,00
			1.936.423,22

Fonte: Autor (2019).

O valor total do orçamento para a implantação do SFV de acordo com a tabela 14, será de R\$ 1.936.423,22. De posse desse orçamento, poderá então ser feito a análise de sua viabilidade técnica-financeira do projeto.

4.9 Análise de retorno de investimento

Para a realização da análise de retorno de investimento propriamente dita, três fatores são muito importantes a serem considerados. Sendo o valor do investimento total do sistema, a vida útil dos SFV, e a previsão de redução dos custos com energia elétrica através da energia geradas pelos módulos FVs. Diante disso, os equipamentos segundo os fabricantes têm uma vida útil de 25 anos, tanto para os módulos FVs quanto para os inversores de carga, o valor de investimento total do sistema será de R\$ 1.936.423,22. Já para prever a redução de gasto

com eletricidade da rede pública, deve se fazer um pequeno ajuste na equação 1 para isolar a variável energia (E) gerada com base na HSP da região em estudo e verificar o rendimento do sistema exatamente pela quantidade de dias de cada mês, e assim determinar a quantidade de energia gerada em cada mês e ter uma média anual mais precisa. Desse modo segue a equação 1 para essa determinação. A tabela 15 mostra os valores de produção de cada mês e a quantidade total ao ano.

$$PP_{MFV} = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}}$$

$$E \text{ (kWh)} = PP_{MFV} * (DIAS_{MES} * HSP_{MA}) * TD$$

$$E_{JANEIRO} = 384,66 * (31 * 4,90) * 0,80$$

$$E_{JANEIRO} = 46.743,88 \text{ kWh}$$

Tabela 15 - Cálculo de energia produzida em cada mês pelo sistema fotovoltaico ao longo do ano.

Mês	Dias	Potência Instalada (Kwp)	Irradiação Solar (HSP _{MA})	Taxa de Desempenho (80%)	Energia Mensal Produzida (Kwh)
Jan	31	384,66	4,90	0,80	46.743,88
Fev	28	384,66	5,08	0,80	43.771,23
Mar	31	384,66	5,20	0,80	49.605,75
Abr	30	384,66	5,10	0,80	47.082,38
Mai	31	384,66	5,10	0,80	48.651,80
Jun	30	384,66	5,36	0,80	49.482,66
Jul	31	384,66	5,63	0,80	53.707,77
Ago	31	384,66	6,09	0,80	58.095,97
Set	30	384,66	6,39	0,80	58.991,46
Out	31	384,66	6,20	0,80	59.145,32
Nov	30	384,66	5,81	0,80	53.636,99
Dez	31	384,66	5,34	0,80	50.941,29
				Total ao ano =	619.856,51

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a tabela 15, é possível verificar a produção de energia pelo SFV em meses individualmente, levando-se em conta apenas os dias de cada um, assim como a produção no período de um ano que foi de 619.856,51 kWh. Com o valor de energia gerado em um ano, e levando multiplicando pelo valor da tarifa aplicada pela empresa fornecedora de energia elétrica CEMAR que é de R\$ 0,43 por kWh valor sem tributos e sem adição da bandeira

tarifária. Nesse contexto, tem-se uma economia de R\$ 268.404,69 anualmente. A tabela 16 mostra o fluxo de caixa projetado e em seguida explicar os dados do payback simples e o descontado.

Tabela 16 - Fluxo de caixa projetado.

Anos	Investimento	Economia Fatura Energia Elétrica	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado	Payback Descontado
0	-R\$1.936.423,22		-R\$1.936.423,22	-R\$1.936.423,22	R\$ 1.936.423,22
1	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 244.004,26	R\$ 1.692.418,96
2	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 221.822,06	R\$ 1.470.596,90
3	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 201.656,42	R\$ 1.268.940,48
4	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 183.324,01	R\$ 1.085.616,47
5	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 166.658,20	R\$ 918.958,27
6	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 151.507,45	R\$ 767.450,82
7	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 137.734,05	R\$ 629.716,78
8	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 125.212,77	R\$ 504.504,01
9	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 113.829,79	R\$ 390.674,22
10	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 103.481,63	R\$ 287.192,59
11	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 94.074,21	R\$ 193.118,38
12	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 85.522,01	R\$ 107.596,38
13	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 77.747,28	R\$ 29.849,10
14	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 70.679,34	R\$ 40.830,24
15	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 64.253,95	R\$ 105.084,19
16	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 58.412,68	R\$ 163.496,87
17	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 53.102,44	R\$ 216.599,31
18	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 48.274,94	R\$ 264.874,25
19	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 43.886,31	R\$ 308.760,56
20	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 39.896,65	R\$ 348.657,21
21	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 36.269,68	R\$ 384.926,89
22	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 32.972,44	R\$ 417.899,33
23	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 29.974,94	R\$ 447.874,27
24	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 27.249,95	R\$ 475.124,21
25	#####	R\$ 268.404,69	R\$ 268.404,69	R\$ 24.772,68	R\$ 499.896,89

Fonte: Autor (2019).

Como já descrito em capítulos anteriores, a análise payback é o tempo decorrido entre o investimento inicial de um projeto e o momento no qual o lucro líquido do mesmo se iguala ao valor desse investimento. O payback simples não leva em consideração a taxa de juros, nem inflação do período. Além disso, nem sempre o fluxo de caixa esperados são constantes. A equação 10 mostra o cálculo do payback simples.

$$PB_S(\text{anos}) = \frac{I_T (\text{R}\$)}{E_A (\text{R}\$)}$$

$$PB_S (\text{anos}) = \frac{1.936.423,22 (\text{R}\$)}{268.404,69 (\text{R}\$)}$$

$$PB_S = 7,21 \text{ anos}$$

Para o cálculo de retorno de investimento do SFV utilizando o payback simples, onde não se usa taxa de jura, e nem leva em conta o dinheiro no tempo, o retorno de do investimento foi aos 7,21 anos depois do investimento. Para iniciar os cálculos de viabilidade econômico do projeto, utilizando o payback descontado que é uma forma mais sofisticada e que leva em sua base estruturada as taxas de juros com relação ao dinheiro no tempo. De forma ilustrativa a equação 11, mostra como se calcula o payback descontado.

$$PB_D (\text{anos}) = \frac{\ln\left(1 - \frac{I_T * i}{A}\right)}{\ln(1 + i)}$$

$$PB_D = 13,42 \text{ anos}$$

Pois o payback descontado considera uma taxa de juros de 10% ao ano, segundo sugere literatura para esse tipo de projeto. Juntamente com o valor total do projeto que foi de R\$ 1.936.423,22, além de outras variáveis como a carga gerada pelos módulos FVs, economia de energia anual através do produto da produção anual dos módulos e o valor da tarifa cobrado pela CEMAR foi possível determinar o tempo de retorno de investimento em 13,42 anos. É importante destacar que, para o cálculo do payback descontado, foi utilizado planilhas eletrônicas para diminuir possíveis erros, dando ainda mais consistências e precisão aos resultados obtidos. Portanto, de acordo a análise financeira realizada para um investimento em geração de energia através de módulos FVs, mais precisamente com o a configuração SFCR, o sistema leva 13, 42 anos para ser totalmente pago, gerando a partir daí uma economia de R\$ 268.404,69 ao ano, até o término da vida útil do sistema que é de 25 anos.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a viabilidade técnica-financeira de implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica em um Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), na cidade de Chapadinha-MA, como alternativa de redução de custos com eletricidade e diversificação energética do mesmo.

No entanto, para a realização desse trabalho, foi realizada uma pesquisa exploratória, através de estudo de caso, onde através de dados de histórico do consumo energético do CCAA, análise de dados solarimétricos da região, assim como seu potencial de geração de energia elétrica através de energia solar, dados técnicos de equipamentos essenciais para o funcionamento pleno do sistema, assim como o seu dimensionamento. Outros fatores importantes nessas análises foram as ferramentas da contabilidade para a análise de retorno de investimento como, análise payback, e seus principais componentes, VPL, TMA, entre outros.

De acordo com os resultados das análises, para a implantação do SFV como forma de reduzir os gastos com energia elétrica, assim como também promover a diversificação energética do CCAA, é viável para o período analisado de 25 anos, pois, as condições apresentadas do ambiente de aplicação, configuração do sistema, a taxa de desempenho e as demais condicionantes, foi possível constatar a viabilidade técnica-financeira desse investimento.

Conclui-se também que, pela redução de custos com eletricidade, o sistema apresentar viabilidade econômica e retorno do investimento do projeto em 13 ano, 5 meses e 2 dias, além de gerar inestimáveis benefícios ao meio ambiente, tendo em vista que a energia elétrica gerada através de energia solar é uma das mais importantes dentro das energias renováveis. Também gera uma economia média anual de R\$ 268.404,69, podendo o CCAA, um dos centros de ensino superior referência na área de agrárias e ambientais do estado do Maranhão, aplicar o valor em mais melhorias na qualidade do ensino dentro da instituição.

O presente trabalho também deixa como forma de pesquisa futura, temas mais específicos não abordados como por exemplo a configuração do sistema com finalidade de criar sensibilidade para outras aplicações mais eficientes de SFVs, possibilitando assim o aprofundamento a nível de especialização e desenvolvimento de projetos de energias fotovoltaico e assim, abrir ainda mais o leque no mercado na região.

REFERÊNCIAS

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.** 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. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em 19/06/2019.

ANJOS, H. V. P. **Estimativa do potencial mundial e brasileiro do aproveitamento da energia geotérmica para geração de eletricidade e uso direto.** Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2018.

ASSIS, A. K. T. and J. A. Hernandes. **A força elétrica de uma corrente: Weber e as cargas superficiais de condutores resistivos com correntes constantes**, volume 73 of Acadêmica. Edusp and Edufal, São Paulo and Maceió, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11704:** Sistemas fotovoltaicos -Classificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008.

BOSS, S. L. B. and J. J. Caluzi. **Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay.** Revista Brasileira de Ensino de Física, 29:635–644, 2007.

BRASIL, MINISTÉRIO de minas e energia. **Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016.** 2019. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia-em-2016>. Acesso em: 28 Jul. 2019.

BRASIL, MINISTÉRIO de minas e energia. **Novos empreendimentos solares devem gerar investimento de 8 bilhões.** 2018. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/novos-empreendimentos-solares-devem-gerar-investimento-de-r-8-bilhoes>. Acesso em: 15 jul. 2019.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO de Minas e Energia. **BEN - Balanço energético nacional 2018 - ano base 2017.** Brasília, 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Brasil chega ao 7º lugar no ranking da geração eólica mundial.** 2018. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-chega-ao-7-lugar-no-ranking-da-geracao-eolica-mundial>. Acesso em: 12 Jul. 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007. 12 v.: il.

CCST/LABREN/INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição**. São Paulo, 2017.

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Energia solar: **Princípios e aplicações**. 2017. Disponível em:

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Potencial solar - SunData**. 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 02 Ago. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018 – Ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em 19/06/2019.

FARIAS, L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. Disponível em: <<http://www.liberato.com.br/upload/arquivos/0119071114445125.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2017.

FRONIUSBRAZIL (São Paulo). **Fronius Symo 17.5-3-S**. 2019. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-lar/produtos/comercial/inversor/fronius-symo/fronius-symo-17-5-3-m>>. Acesso em 01 Ago. 2019.

HOBBSAWN, Eric J. **Industry and empire: the pelican economic history of Britain, volume 3, From 1750 to the present day**. Harmondsworth: Pelican, 1969.

INTERNATIONAL STANDARD. **IEC60364-1: Low-voltage electrical installations – Part 1**. Switzerland, 2005.

JARDIM, C. S. **A inserção da geração solar fotovoltaica em alimentadores urbanos enfocando a redução do pico de demanda diurno**. 2007. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

KIPP & ZONEN. Disponível em <<http://www.kippzonen.com/>> Acesso em 06 abril 2017.

LODI, C. **Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MOLINARI, R. et al. **A energia nuclear e sua atratividade para a iniciativa privada. XX Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica - SNPTEE**. Recife, 2009.

- NEOSOLAR (São Paulo). **Painel solar fotovoltaico Yingli YL-330P- 330B**. 2017. NeoSolar. Disponível em: < https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl330p-35b-330wp.html?gclid=CjwKCAjwnMTqBRAzEiwAEF3ndqVVpc9BiueeClSk9mT91G0tUQmSHQgJuZPEupX9hnNVXcAyIF1qiBoCNUkQAvD_BwE>. Acesso em: 08 Ago. 2019.
- NUSSENZVEIG. H. M. **Curso de Física Básica** – vol. 3 1ª edição – São Paulo: Editora Blücher, 1997.
- Pinho, J.; Galdino, A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPREL-CRESEB, 2013. 530p.
- PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. 2019. Portal solar. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>: Acesso 17/07/2019.
- RÜTHER, R., NASCIMENTO, L. R., CAMPOS, R. A. **Extreme overirradiance events in Brazil: consequences on PV power plant output performance**, submitted to Solar Energy, 2017.
- SILVA FILHO, Donato. **Dimensionamento de Usinas Hidroelétricas através de técnicas de otimização evolutiva**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.
- Silva Junior, C. A. F. da. **Geração de energia fotovoltaica: estudo de viabilidade para uma empresa de pequeno porte na cidade de Matinha-MA**. São Luís, 2017.
- TIBA et al. Chigueru. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**/coordenador Chigueru Tiba... et al.- Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.: il., tab., mapas.