



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NICOLAU VALDEMAR QUEIROZ SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PLANOS
E COM CONCENTRAÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO EM PAULO AFONSO - BA**

JUNHO/2019
PAULO AFONSO/BA

NICOLAU VALDEMAR QUEIROZ SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PLANOS
E COM CONCENTRAÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO EM PAULO AFONSO/BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Bahia - IFBA, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. MSc. Danielle Bandeira M. Delgado.
Co-orientador: Prof. MSc. Urbano Uellington Secundes

Paulo Afonso
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

S586 Silva Júnior, Nicolau Valdemar Queiroz

Análise técnica e econômica de módulos fotovoltaicos planos e com concentração : estudo comparativo em Paulo Afonso/BA / Nicolau Valdemar Queiroz Silva Júnior. – Paulo Afonso, 2019.

64 f. : il. ; 30 cm

Orientadora: Profa. Me. Danielle Bandeira de Mello Delgado

Coorientador: Prof. Me. Urbano Uellington Secundes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Bahia, Campus Paulo Afonso, 2019.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3. Energia elétrica - Produção. 4. Paulo Afonso (BA). I. Instituto Federal da Bahia, Campus Paulo Afonso II. Delgado, Danielle Bandeira de Mello. III. Título.

CDD – 621.3191

Elaborada por Ana Paula Santos Souza Teixeira – CRB-5/1779

TERMO DE APROVAÇÃO

NICOLAU VALDEMAR QUEIROZ SILVA JÚNIOR

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PLANOS E COM CONCENTRAÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO EM PAULO AFONSO/BA

Aprovado em _____ de _____ de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Danielle Bandeira de Mello Delgado, MsC. (Orientadora)

Prof^o. Urbano Uellington Secundes, MsC. (Coorientador)

Prof^a. Evandro Ailson de Freitas Nunes, MsC.

Téc. Fernando Carlos Ferreira de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me permitido vivenciar essa experiência na graduação e realizar este sonho, por nunca ter me deixado duvidar da sua presença durante esta caminhada acadêmica.

À minha mãe, meu pai e meus irmãos, que são e foram de extrema importância para este ciclo acadêmico. Sempre muito dispostos a auxiliar e com muita paciência para ouvir e aconselhar, com certeza era notório no falar o amor que vocês têm por mim, sou eternamente grato por cada palavra e puxão de orelha quando necessário, eu amo vocês.

A minha orientadora e amiga, Professora Msc. Danielle Bandeira de Mello Delgado, sempre muito atenta aos mínimos detalhes e presente nos momentos de dúvidas, me guiando neste percurso da universidade seja com algum trabalho ou atividade extra IFBA. Com certeza, me proporcionou um crescimento pessoal, acadêmico e profissional enorme. Tenha certeza que lembrarei com muito carinho dos nossos momentos de descontração e de troca de conhecimento.

Ao meu co-orientador e amigo, Professor MsC. Urbano Uellington Secundes muito disposto a compartilhar do seu conhecimento com os alunos, sempre muito atencioso e parceiro. Me acolheu em momentos de orientação e me mostrou que o sucesso depende apenas de nós.

Aos meus amigos Guildys, Erick e Alisson, sinônimo de amizade e parceria para qualquer momento e situação. Sou grato por ter dividido com vocês cada minuto no curso, seja por nossas risadas e piadas internas até o nosso estresse diário com a peculiaridade de cada um por assim dizer.

Aos meus amigos, Alexandre, Everton, Léo, Lucas Fonseca, Jonathans, Vincenzo e João Marcos que sempre estiveram comigo, sempre me apoiando nas minhas decisões e respeitando meu espaço de tempo, tenho um carinho enorme por cada um de vocês

A Luminus Jr, por ter me proporcionado viver este ambiente profissional ainda na graduação e mostrar que independente das nossas personalidades, somos mais fortes juntos.

As minhas amigas Karol, Loreнна, Joana, Ana Clara e Thaís, meus sinceros agradecimentos em conhecer cada uma, que me ensinaram a ser mais amigo e mais parceiro. Tenho um carinho enorme por cada uma e tenho certeza que teremos muitos momentos juntos.

A Thainá, uma menina que me mostrou como ser determinado e batalhar cada vez mais por seus objetivos. Agradeço muito por ter te conhecido e por termos compartilhados muitos momentos no curso, sabemos que não foi fácil, mas expresso aqui a minha admiração por você.

Ao EAC e EJC, por me mostrar sempre esse amor ao próximo e me acolher sempre de braços abertos. Com certeza, contribuíram muito para o meu crescimento pessoal.

A Sintia, por sempre me escutar e me mostrar o quanto sou capaz de alcançar meus sonhos. Me mostrou o sentido literal da palavra amizade, tenho uma grande admiração e carinho por você.

Ao meu parceiro, Francisco Júnior, que me incentivou e acreditou no meu potencial desde nosso primeiro contato, sem dúvidas aprendi muito com nossa caminhada juntos.

Ao meu amigo, Fernando Carlos, com certeza um cara impar na engenharia. Aprendi muito durante esse tempo na graduação com você, sempre disposto a ajudar no que fosse necessário. Ficam aqui os meus sinceros agradecimentos.

Aos professores e funcionários do IFBA – Campus Paulo Afonso que me auxiliaram nesta caminhada árdua e de muita dedicação, saibam que vocês contribuíram de uma forma especial para que fosse possível realizar este sonho, meu muito obrigado!

RESUMO

As fontes renováveis de energia, principalmente a solar, têm crescido exponencialmente no mundo durante os últimos anos, de maneira a contribuir para o crescimento da matriz energética dos países. A energia solar contribui para uma nova configuração de energia e alternativa para as fontes hídricas, principalmente por ser limpa, renovável e viável economicamente. O Brasil, assim como os outros países, tem aproveitado da fonte solar, tendo em vista que ele apresenta os melhores índices de radiação solar do mundo, com o Nordeste como principal região para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. Neste sentido, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo de viabilidade técnico-econômica entre dois sistemas de microgeração fotovoltaica, utilizando módulos planos de Silício Policristalino e módulos com concentração óptica, com base em células de múltipla junção para a localidade de Paulo Afonso - BA. Os dados meteorológicos foram coletados através do Centro Regional de Energia Solar e Eólica (CRESESB) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a fim de obter os dados de Irradiação Global – GHI e Irradiação Normal Direta – DNI para serem utilizados como parâmetro para estimativa de geração de energia elétrica. Após o tratamento de dados da radiação, utilizou-se o software livre *Retscreen Expert 2017* para simular a estimativa de geração de ambos os sistemas. Além de que, os dados do sistema com concentração, com potência de 10 kWp, instalada na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE Campus Recife foram utilizados como parâmetro para a simulação que foi realizada para se ter um maior índice de confiabilidade dos dados estimados de geração de energia elétrica. Analisou-se a estimativa de geração de energia elétrica para ambos os sistemas, de forma a verificar a eficiência de cada um deles, usando como parâmetro o fator de capacidade e fator de desempenho. Além disso, realizou-se um estudo econômico com ferramentas da engenharia econômica para se observar o tempo de retorno da aplicação do investimento, através dos métodos usados na economia, como VPL, TIR e Payback.

Palavras-chave: Sistema de Energia Fotovoltaica. Energia Solar. Energia Elétrica.

ABSTRACT

Renewable energy sources, especially solar energy, have grown exponentially in the world in recent years in order to contribute to the growth of the countries' energy matrix. Solar energy contributes to a new configuration of energy and alternative to water sources, mainly because it is clean, renewable and economically viable. Brazil, like other countries, has taken advantage of the solar source, considering that it presents the best solar radiation rates in the world, with the Northeast as the main region for the development of photovoltaic technology. In this sense, the present work presents a comparative study of technical and economical feasibility between two photovoltaic microgeneration systems, using flat modules of Polycrystalline Silicon and modules with optical concentration, based on multiple junction cells for the Paulo Afonso - BA locality. The meteorological data were collected through the Regional Solar and Wind Energy Center (CRESESB) and the National Meteorological Institute (INMET), in order to obtain the data of Global Irradiation - GHI and Direct Normal Irradiation - DNI to be used as a parameter for estimation of electricity generation. After the radiation data treatment, the free software Retscreen Expert 2017 was used to simulate the estimation of generation of both systems. Besides that, the data of the system with concentration, with power of 10 kWp, installed in the Federal University of Pernambuco - UFPE Campus Recife were used as parameter for the simulation that was performed to have a higher index of reliability of the estimated data of generation of electricity. The estimation of electric power generation for both systems was analyzed, in order to verify the efficiency of each of them, using as parameter the capacity factor and performance factor. In addition, an economic study with economical engineering tools was carried out to observe the return time of the investment application, through the methods used in the economy, such as NPV, TIR and Payback.

Key Words: Photovoltaic Power System. Solar energy. Electric power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Recursos energéticos totais na terra.....	19
Figura 2 – Geração e Potência instalada Solar no Mundo.	20
Figura 3 – Capacidade instalada e Fator de Capacidade, no Mundo.....	21
Figura 4 – Potência instalada Micro e Minigeração distribuída por setor em MW.....	22
Figura 5 – Potência instalada fotovoltaica no Brasil	23
Figura 6 – Curva característica de um painel fotovoltaico.....	25
Figura 7 – Células de silício monocristalino e policristalino.....	26
Figura 8 – Estrutura da célula de silício amorfol.....	27
Figura 9 - Princípio de concentração fotovoltaica.....	28
Figura 10 - Comparação entre lentes de Fresnel e Convencionais.....	29
Figura 11 – Sistema concentrador estático.	30
Figura 12 - Sistema com seguimento de um eixo	31
Figura 13 – Rastreador com dois eixos do tipo pedestal.....	31
Figura 14 - Modelo do sistema de rastreamento com dois eixos tipo mesa girante. .	32
Figura 15 – Sistema de rastreamento de dois eixos tipo rolo.....	33
Figura 16 – Partes principais dos módulos fotovoltaicos, composição dos módulos e do suporte auxiliar..	34
Figura 17 – Células de tripla junção – múltiplas junções.....	35
Figura 18 – Esquema de uma célula de múltipla junção	36
Figura 19 – Esquema do sistema HCPV na UFPE – Campus Recife	40
Figura 20 – Irradiação solar média diária em Paulo Afonso - BA.....	46

Figura 21 - Irradiação solar média diária em Recife - PE.....	47
Figura 22 - Sistema com concentração localizado na UFPE – Campus Recife.....	63
Figura 23 - Sistema de proteção do sistema com concentração da UFPE.....	63
Figura 24 - Partes mecânicas do sistema com concentração.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sistema de Concentração (Paulo Afonso/BA).....	50
Quadro 2 – Sistema de concentração (Recife/PE).....	50
Quadro 3 – Simulação para o sistema plano em Paulo Afonso/BA.....	52
Quadro 4 – Simulação da viabilidade econômica para o sistema concentrado de 10 kWp.....	55
Quadro 5 – Simulação da viabilidade econômica para o sistema plano de 10 kWp.	56
Quadro 6 – Comparação entre a viabilidade econômica dos sistemas.....	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Irradiação solar global das cidades de Recife e Paulo Afonso.	38
Gráfico 2 – Irradiação solar direta das cidades de Recife e Paulo Afonso.....	39
Gráfico 3 – Comparação de geração de energia elétrica entre os dados medidos e simulados para localidade de Recife – PE.	41
Gráfico 4 – Radiação direta das cidades de Paulo Afonso e Recife.	48
Gráfico 5 – Energia gerada em kWh em Paulo Afonso e Recife.....	51
Gráfico 6 – Energia gerada em kWh em Paulo Afonso /BA.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
CRESESB	Centro Regional de Energia Eólica e Solar
CSP	Tecnologia com concentração
DDP	Diferença de Potencial
DIF	Irradiação Solar Difusa
DNI	Irradiação Solar Direta
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FC	Fator de Capacidade
GHI	Irradiação Global Horizontal
HCPV	Sistema Fotovoltaico com Alta Concentração
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MJ	Múltipla junção
MME	Ministério de Minas Energia
MW	Mega Watt
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PMMA	Poly Methyl Methacrilato
PR	Parâmetro de desempenho
SOG	Silicon Over Glass
SSA	Sistema de Suporte Auxiliar
TIR	Taxa Interna de Retorno
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. JUSTIFICATIVA	17
3. OBJETIVO	18
3.1. Objetivo Geral	18
3.2. Objetivos Específicos	18
4. REFERENCIAL TEÓRICO	19
4.1. Energia Solar no mundo.....	19
4.2. Energia Solar no Brasil.....	21
4.3. Recurso solar	23
4.4. Sistema Fotovoltaico	24
4.5. Tipos de tecnologia fotovoltaica	26
4.5.1. Módulo fotovoltaico de silício monocristalino	26
4.5.2. Módulo fotovoltaico de silício policristalino	26
4.5.3. Silício amorfo	27
4.5.4. Células orgânicas	27
4.6. Sistema com concentração óptica	28
4.6.1. Sistema de seguimento	30
4.6.2. Células de múltiplas junções.....	34
4.7. Questões ambientais	36
5. METODOLOGIA	38
5.1. Avaliação dos parâmetros meteorológicos	38
5.2. Simulação dos sistemas de microgeração fotovoltaica	40
5.3. Comparação do sistema HCPV e o sistema plano fixo	42
5.4. Análise econômica.....	44
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
6.1. Condições Meteorológicas	46
6.2. Sistema com concentração óptica	49
6.3. Sistema fotovoltaico plano fixo	52
6.4. Viabilidade econômica	54
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58

REFERÊNCIAS.....60

APÊNDICE.....63

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do mundo moderno consiste no aumento da geração de eletricidade para suprir a crescente demanda nos diversos setores da sociedade. Segundo a EPE, as fontes que apresentam maior contribuição no mundo para a geração de energia são petróleo, carvão e gás natural. Sendo que a emissão dos gases agrega a poluição do meio ambiente e contribui para o fenômeno do efeito estufa.

Dessa forma, os países começaram a optar por alternativas de energia que fossem sustentáveis, ou seja, fontes limpas e renováveis que dentre elas se destacam a energia solar e a eólica. Neste panorama, os países têm investido cada vez mais em estudos e nas tecnologias que possam realizar o maior uso destas fontes, como é o caso do Brasil que tem desenvolvido um sistema de geração distribuída utilizando a tecnologia fotovoltaica no país.

O Brasil apresenta altos níveis de radiação solar, quando comparado a outros países ao redor do mundo. A irradiação solar no Brasil apresenta uma média anual muito uniformizada, onde as regiões têm uns valores altos variando entre 1500 – 2500 Wh/m² (PEREIRA *et al*, 2006). Essa energia pode ser aproveitada para diversos ramos como iluminação, aquecimento de água e localidades, ou até mesmo para geração de energia elétrica.

O Nordeste é a região brasileira que apresenta fatores meteorológicos favoráveis, por possuir os maiores índices de radiação, para a utilização deste tipo de energia. Com o atual panorama nordestino em que o potencial hídrico se encontra próximo de se esgotar, uma das alternativas para suprir esse problema é o investimento nas fontes renováveis, em especial a solar com a tecnologia fotovoltaica convencional e a eólica através de aerogeradores (EPE, 2012).

As tecnologias fotovoltaicas convencionais baseadas em Silício dominam o mercado fotovoltaico mundial, sendo as responsáveis por quase 90% da produção de módulos em 2014 (FRAUNHOFER INSTITUTE ISE, 2014). Desde então, a crescente da tecnologia fotovoltaica começou a ganhar espaço na matriz energética, de modo que através do sistema de geração distribuída conectado a rede se tornou acessível

a população aproveitar a energia solar através dos módulos em sua própria residência, sendo a principal aplicação deste sistema.

De modo que, a produção de energia elétrica gerada através dos módulos fotovoltaicos convencionais planos, segundo a ANEEL de acordo com a resolução normativa 482/2012, pode ser armazenada em formato de créditos pela concessionária para ser descontado do consumo de energia seja da residência, indústria ou comércio.

Os sistemas planos convencionais possuem baixo aproveitamento da radiação solar, assim a busca por desenvolver este tipo de sistema para se obter um maior desempenho no aproveitamento e conversão da energia solar surge o sistema com concentração óptica, utilizando células fotovoltaicas de múltipla junção.

Essa tecnologia fotovoltaica com concentração óptica chega com uma abordagem alternativa às tecnologias fotovoltaicas convencionais planas com o intuito de fornecer energia elétrica com maior aproveitamento da radiação solar através do princípio óptico. De um modo geral, a diferença está em diminuir a utilização do material semicondutor necessário na composição das células, comparativamente, mais caro, ao incorporar sistemas ópticos, os quais utilizam materiais mais econômicos.

A produção da nova geração de células fotovoltaicas busca melhorar o desenvolvimento da sua eficiência individual, através de um conjunto de semicondutores que organizados conseguem aproveitar o máximo do espectro solar quando incidido sobre a célula, sendo essa chamada de célula de multijunção.

Nesse contexto, este trabalho, consiste em um estudo comparativo entre dois sistemas fotovoltaicos, um com módulos planos de Silício e o outro com concentração óptica, a fim de verificar o desempenho relacionado à viabilidade técnica e econômica de cada um dos sistemas na região do município de Paulo Afonso – BA, considerando suas condições meteorológicas e a possibilidade de compensação de energia pela concessionária local.

2. JUSTIFICATIVA

Com o fomento das fontes renováveis não convencionais na matriz energética brasileira, a energia solar fotovoltaica configura uma das possibilidades de geração de eletricidade de forma limpa, sustentável e economicamente viável se consideramos a vida útil do sistema.

No mundo, os sistemas fotovoltaicos têm apresentado uma crescente exponencial como alternativa de geração de energia elétrica. No cenário brasileiro, o Nordeste apresenta os maiores índices de radiação solar que proporciona um maior aproveitamento solar pelos sistemas fotovoltaicos, de forma a ser uma nova alternativa de energia para a matriz energética, que apresenta a geração hidráulica como principal fonte de energia.

Além das tecnologias de módulos fotovoltaicos planos, que são quase que as totalidades dos sistemas instalados no Brasil existem outras tecnologias que necessitam ser estudadas, como por exemplo, os sistemas fotovoltaicos que utilizam concentração óptica.

Regiões com pouca nebulosidade se tornam peças chaves para a implantação de sistemas de concentração, uma vez que os módulos de concentração solar só aproveitam parte da irradiância direta. No entanto, para regiões que apresentem alto índice de recurso solar, mas com muita nebulosidade, será necessário fazer um estudo analítico entre os dois tipos de sistemas – com e sem concentração - para verificar qual dentre eles é o mais viável.

3. OBJETIVO

3.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo de viabilidade técnico-econômica entre dois sistemas de microgeração fotovoltaica, utilizando módulos planos fixos de Silício Policristalino e módulos de concentração óptica com células de múltipla junção.

3.2. Objetivos Específicos

Quanto aos objetivos específicos busca-se:

- Estudar as condições meteorológicas adequadas para a geração de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos convencionais planos e com concentração óptica;
- Realizar um levantamento de dados climatológicos do município de Paulo Afonso – BA através de dados de satélite bem como de estações meteorológicas;
- Caracterizar, por meio de um estudo de caso, dois sistemas de geração fotovoltaica de mesmas características técnicas, sendo o primeiro utilizando painéis planos e outros painéis com concentração;
- Simular, por meio dos dados obtidos, considerando as características climatológicas do município de Paulo Afonso – BA, a geração de energia elétrica pelos dois sistemas para análise técnica e econômica;
- Fazer um estudo da viabilidade econômica para os dois tipos de sistemas;
- Mostrar as vantagens e desvantagens de cada um dos tipos de sistema;

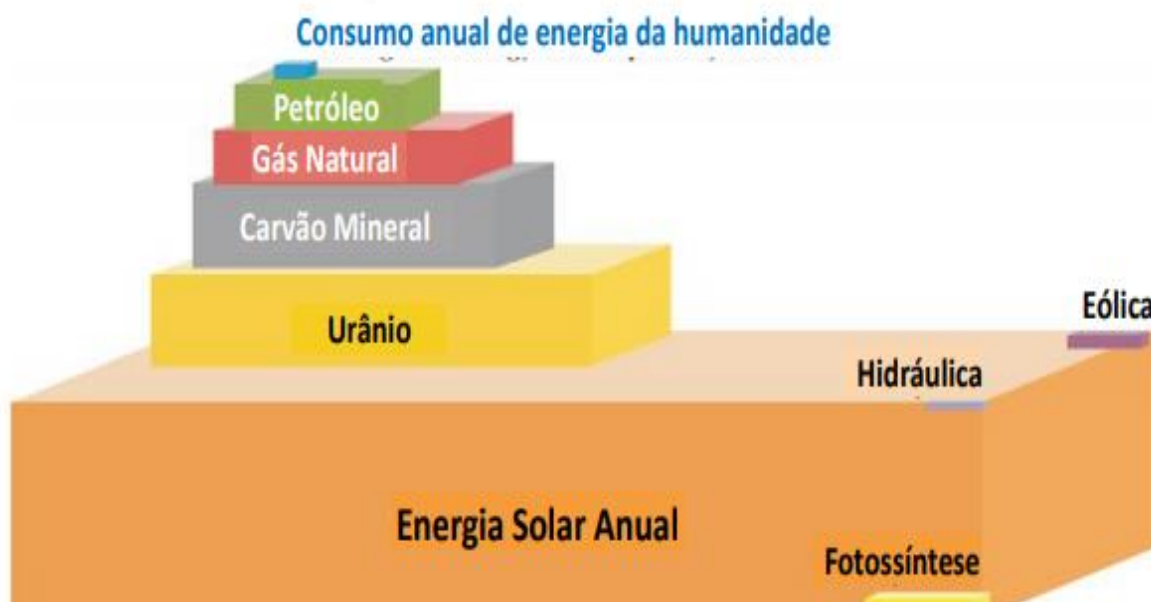
4. REFERENCIAL TEÓRICO

A energia solar é determinada como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá através de um aparelho conhecido como célula fotovoltaica que opera utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico (IMHOFF,2007).

4.1. Energia Solar no mundo

O potencial mundial de energia solar em proporção com os recursos energéticos de outras fontes de energia é superior em quantidade, como mostra a Figura 1. Em que regiões podem chegar a ter valores maiores que 3.000 kWh/m²/ano de radiação solar segundo o Ministério de Minas Energia (2017), como é o caso da Austrália, cidades do Norte e Sul da África, Oriente Médio, parcela da Ásia Central, México, toda parte do sudoeste dos Estados Unidos, Peru, uma parte da Índia e Chile.

Figura 1 – Recursos energéticos totais da Terra.



Fonte: MME. 2017

As tecnologias fotovoltaicas com módulos planos convencionais utilizam da energia solar para conversão em energia elétrica, sendo que precisam estar orientadas em um sentido para que possam aproveitar o máximo de irradiação, enquanto que o sistema com concentração tem um sistema de seguimento ao sol que

permite se posicionar para receber a irradiação. Dentre alguns parâmetros para análise da geração de energia, tem-se o fator de capacidade (GOUVEIA, 2015).

O fator de capacidade (%) é a capacidade que o sistema possui de operar com sua potência nominal durante um período de um dia sem para, no caso permanecer às 24 horas em operação. Avalia, de fator, o aproveitamento de geração de energia do sistema para se ter um parâmetro de eficiência (OLIVEIRA, 2002)

Segundo o Ministério de Minas e Energia em 2017, o mundo apresentava uma potência instalada de 301 GW, dos quais 294 GW correspondia ao sistema fotovoltaico convencional e 7 GW ao sistema fotovoltaico com concentração. De forma, que resultou em uma geração de 333 TWh com um fator de capacidade de 14,4%.

Figura 2 – Geração e Potência instalada Solar no Mundo

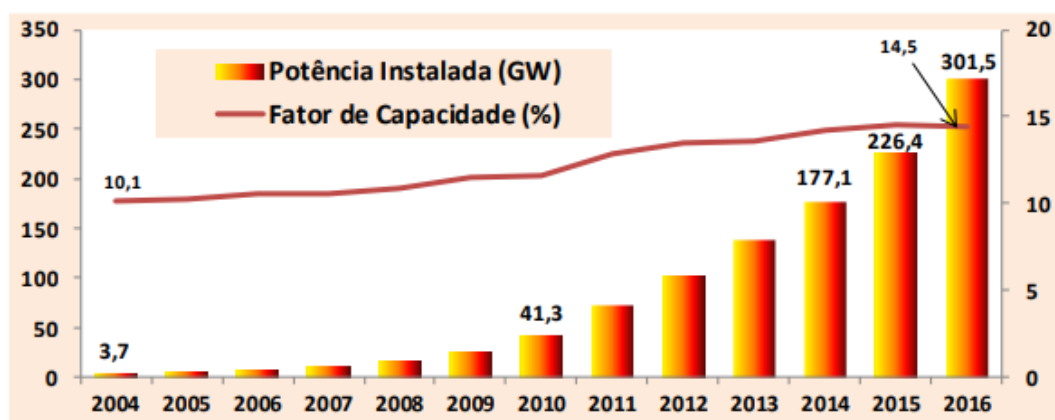
	País	Geração (TWh)	% da Geração Total	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)	Expansão no Ano (GW)
1	China	66,2	1,1	78.070	13,2	34,5
2	Estados Unidos	56,8	1,3	40.300	18,6	14,7
3	Japão	49,5	4,9	42.750	14,9	8,6
4	Alemanha	38,2	5,9	41.275	10,8	1,5
5	Itália	22,9	8,1	19.279	13,7	0,4
6	Espanha	13,6	5,0	5.490	28,3	0,1
7	Índia	11,9	0,8	9.010	18,8	4,0
8	Reino Unido	10,3	3,1	11.727	11,0	2,0
9	França	8,3	1,5	7.130	13,8	0,6
10	Austrália	7,2	2,8	5.488	15,8	0,8
11	Coréia do Sul	5,2	0,9	4.350	15,2	0,9
12	Grécia	4,0	8,2	2.611	17,5	0,0
13	África do Sul	3,3	1,3	1.544	27,6	0,5
14	Canadá	3,1	0,5	2.715	13,4	0,2
15	Bélgica	3,0	3,6	3.422	10,1	0,2
	Outros	29,7	0,4	26.313	14,6	6,3
	Mundo	333,1	1,4	301.473	14,4	75,1
	% do mundo	1,4		4,7		34,9

Fonte: MME, 2017.

Em 2017, quinze países se destacaram no cenário de geração solar, no qual a Grécia obteve um percentual de 8,2% com relação a geração total e 2.611 MW de potência instalada como ilustra a Figura 2, se destacando por 1% a mais que a Itália como o país que obteve o maior percentual de geração solar. (ANEEL, 2017)

Além disso, ocorre um destaque para a Espanha que apresenta um fator de capacidade de 28,3% decorrente de obter a presença de uma potência instalada acima de 40% dos sistemas com concentração como ilustrado na Figura 2, com um estoque de calor que varia entre 7 a 8 horas para suprir nos horários que não tiver sol. Com previsão para 2018, o Brasil deverá estar entre os quinze países que mais geram energia solar no mundo. (ANEEL, 2017).

Figura 3 – Capacidade instalada e Fator de Capacidade, no Mundo.



Fonte: MME, 2017

As tecnologias fotovoltaicas tem uma crescente exponencial desde 2004, onde mostra que a geração solar no mundo começou a ganhar espaço na matriz energética com o aumento de porte das instalações e com a chegada dos sistemas com concentração que traz consigo o aumento do fator de capacidade, que em 2016 chega à marca de 14,5%, como é possível observar na figura 3. (MME, 2017)

4.2. Energia Solar no Brasil

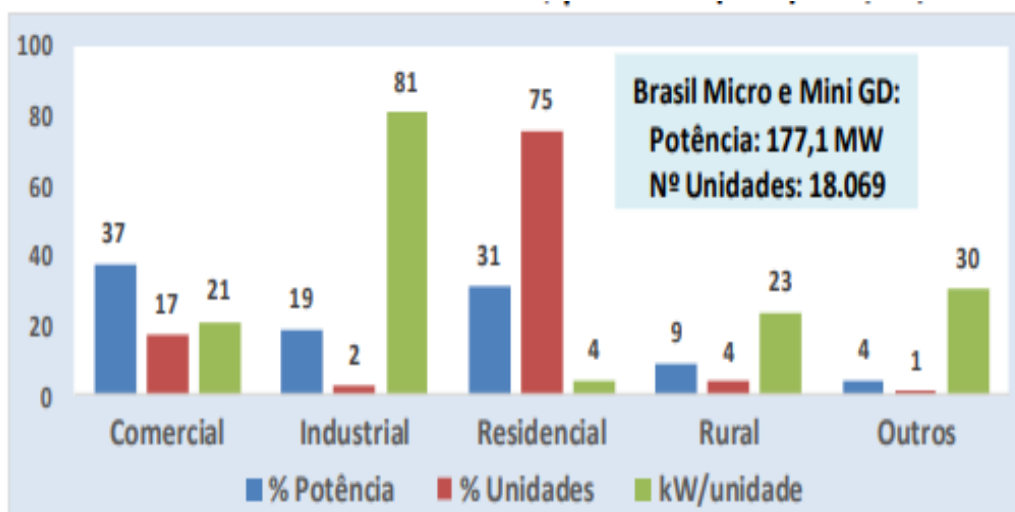
Segundo o MME (2017), de maneira a aproveitar a energia solar no Brasil por meio dos sistemas fotovoltaicos tem se buscado atender as comunidades isoladas da rede de energia elétrica e desenvolver a região, contando com apoio técnico, científico e financeiro de diversos órgãos e instituições brasileiras.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2017), o Brasil apresenta um grande potencial solar principalmente da região Nordeste, onde se encontram os maiores

valores de irradiação solar global e com menor taxa de variação anual em relação às condições climáticas de nebulosidade e chuvas.

Segundo a ANEEL, em 2017, o Brasil já apresentava 177,1 MW de potência instalada de sistemas fotovoltaicos para o sistema distribuído. Considerando as fontes de mini e microgeração distribuída o setor comercial tem a maior participação em relação a potência, pois detém de um percentual de 37%, em relação ao adesão do sistema está o residencial com 74% e o setor industrial lidera a potência média por usuário com 81 kW, como ilustra a figura 4.

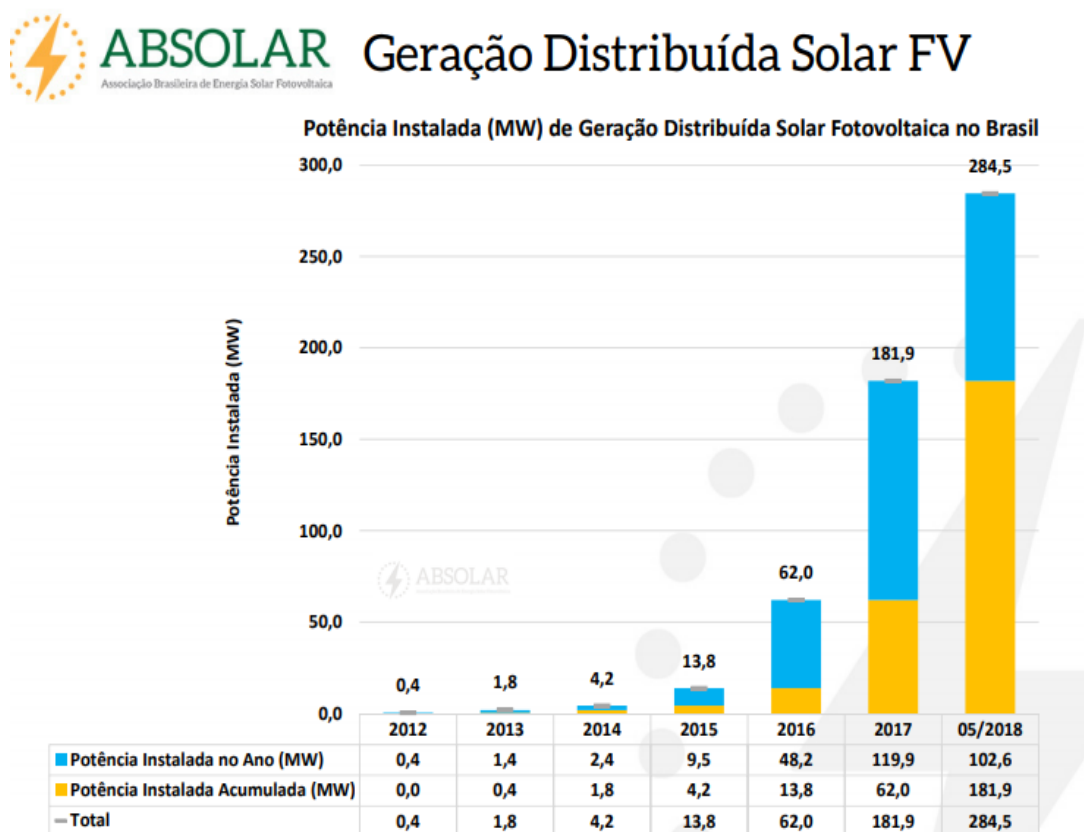
Figura 4 – Potência instalada Micro e Minigeração distribuída por setor em MW



Fonte: MME, 2017

Em 2018, a ABSOLAR exibiu uma potência instalada total de 284,5 MW de modo que até o dia 19/06/2018 foram computados 102,6 MW e com o acumulado do ano de 2017 (181,9 MW), com uma crescente exponencial desse tipo de sistema a cada ano, como é possível observar na figura 5. Essa crescente se deve a população brasileira em querer gerar energia renovável na sua residência, mas ainda encontram resistência a aderir ao sistema de financiamento que se torna o ponto chave para a disseminação desse tipo de sistema ainda ser mais presente na matriz energética.

Figura 5 – Potência instalada fotovoltaica no Brasil



Fonte: ABSOLAR, 2018

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2017), existem planos de expansão de energia solar no Brasil começando pelo Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2026, que apresenta uma estimativa de que haverá uma capacidade de geração instalada em torno de 13 GW no ano de 2026, sendo uma parcela dela de geração centralizada (9,6 GW) e a outra parte de geração distribuída (3,4 GW) e outros projetos que venham a desenvolver esse tipo de tecnologia.

4.3. Recurso solar

A radiação solar, que incide sobre o globo terrestre pode ser decomposta em outros tipos de radiações. No caso da tecnologia fotovoltaica, a irradiação que é de interesse é chamada Irradiação Global Horizontal (GHI), que é absorvida por superfícies planas e horizontais de modo que este tipo de radiação ainda é composto

pela Irradiação Solar Difusa (DIF) e a Irradiação Normal Direta (DNI) (URIBE, 2015).

O DIF é uma parcela fora de ordem e atenuada pela reflexão das nuvens, poeira, vapor d'água, CO₂ e outros elementos de suspensão na atmosfera. Enquanto que o DNI é uma radiação que atinge diretamente a superfície, onde não sofre reflexão. Essa radiação, em comparação com a GHI é muito variável, principalmente em localidades que apresentem grandes índices de nebulosidade e emissão de poluentes. Sendo que prevalece em dias claros, ou seja, sem nebulosidade e este tipo de radiação é aproveitado em sistemas com concentração (URIBE, 2015).

Além disso, o posicionamento da Terra em relação ao Sol irá determinar o posicionamento dos painéis solares, em relação ao Norte e ao plano horizontal. Tendo cuidado para os painéis fixos que precisam estar bem adequados à irradiação solar para captarem o máximo de radiação GHI possível, já que eles não acompanham a trajetória do Sol (EPE, 2012).

Com relação ao Hemisfério Sul, que apresenta uma irradiação solar menor durante o ano, os módulos fotovoltaicos precisam estar em orientação para o Norte “verdadeiro” de modo que a inclinação com o plano horizontal possa ser ajustada para melhorar o rendimento da produção de energia elétrica em cada estação do ano. Em geral, a inclinação precisa estar próximo da latitude do local onde será feita a instalação (ANEEL, 2017).

4.4. Sistema Fotovoltaico

Os principais componentes dos sistemas fotovoltaicos são os painéis ou módulos solares que são usados para geração de energia elétrica. Eles podem ser realocados em vários arranjos, sendo em série ou paralelo a depender da tensão e corrente estabelecida como parâmetro. De início, teremos a captação da radiação solar pelos módulos, onde o conjunto destes módulos se chama gerador fotovoltaico, a figura 6 ilustra a curva característica do painel fotovoltaico (EPE, 2012).

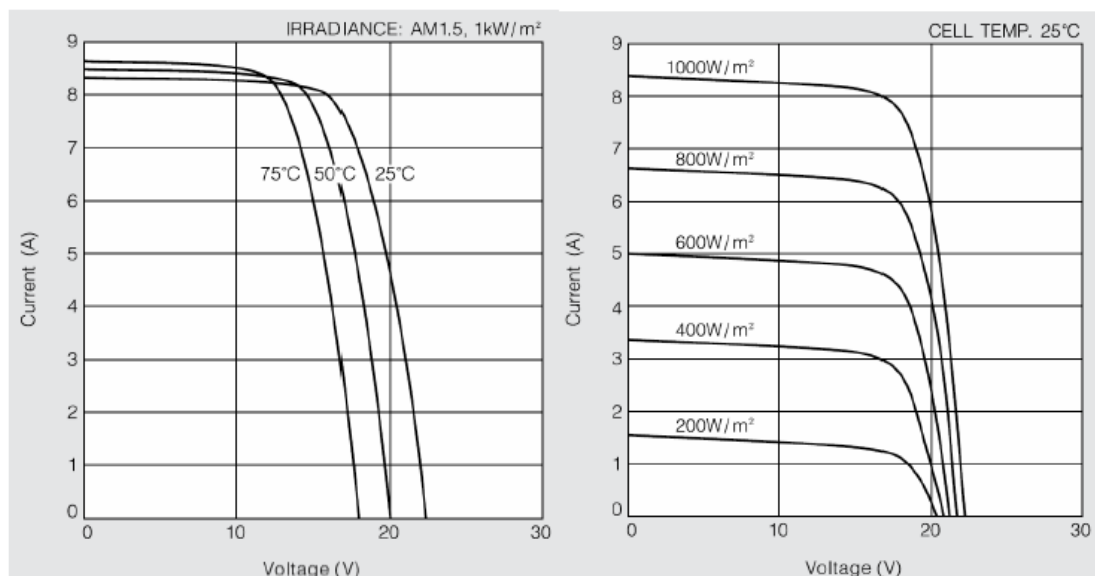


Figura 6 – Curva característica de um painel fotovoltaico.

Fonte: Keyocera, 2016

O aproveitamento energético através da geração de energia se deve pela presença de semicondutores que são fotossensíveis, a partir deles existe a conversão da radiação solar em uma DDP – Diferença de Potencial – nos terminais da junção P-N², na qual a ligação elétrica entre os terminais resulta em uma corrente contínua (MACHADO, 2014).

Os principais fatores que interferem na eficiência da placa solar no processo de conversão são a temperatura de operação e a intensidade da radiação solar que chega até os painéis solares. Sendo que o fator radiação sofre alteração a medida que a localidade apresenta nebulosidade, quanto pela inclinação da célula fotovoltaica em relação ao sol. De modo, que a eficiência é reduzida ao longo da vida útil dos módulos, principalmente para sistemas fixos. (EPE, 2012).

Atualmente, existem vários tipos de tecnologia sendo utilizada para a geração solar fotovoltaica. Nas seções a seguir, serão tratadas algumas das tecnologias mais utilizadas nos sistemas já instalados, bem como tecnologias que vêm sendo estudadas nos centros de pesquisa para o desenvolvimento das mesmas.

4.5. Tipos de tecnologia fotovoltaica

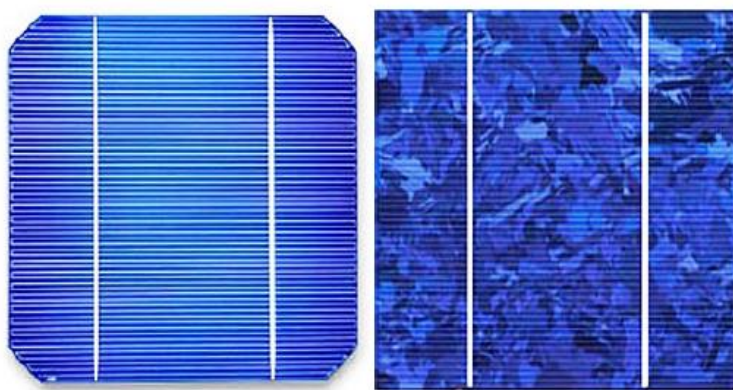
4.5.1. Módulo fotovoltaico de silício monocristalino

Uma parte dos painéis fotovoltaicos de silício monocristalino, comumente chamados de células, são formados pelo cristal semente, ou seja, por pedaços de apenas um cristal, que através da técnica de Czochralski, são colocados em silício fundido (MIRANDA, 2015). Neste método, o cristal recolhe pequenas porções de boro criando um semicondutor com dopagem do tipo “p”. Então, depois do corte no semicondutor é inserido impurezas do tipo “n”, colocadas a vapor de fósforo em fornalha com altas temperaturas, assegurando a segurança e competência aos produtos (CEPEL & CRESEB, 2004; CEMIG, 2012).

4.5.2. Módulo fotovoltaico de silício policristalino

Segundo Ruther (2004), o painel solar de silício policristalino apresenta um rendimento inferior em relação ao silício monocristalino, inclusive se forem produzidos por materiais idênticos. Isso acontece porque o “Si-p” não é construído por um cristal, ele é derretido e solidificado, gerando um bloco com elevadas quantidades de partículas ou cristais, acumulando uma parcela maior de defeitos. Este tipo de tecnologia tem menor custo quando comparadas com as células monocristalinas. A Fig. 7 ilustra o aspecto apresentado por uma célula de silício monocristalino e outra de silício policristalino.

Figura 7 – Células de silício monocristalino e policristalino.

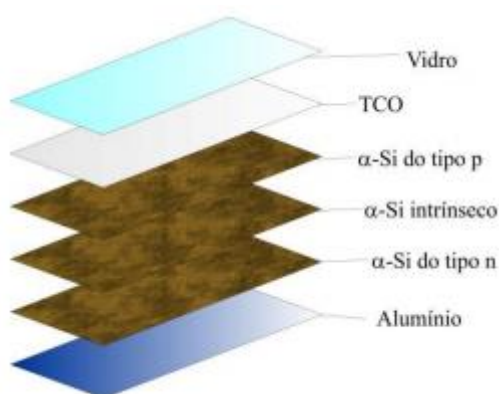


Fonte: EPE, 2012.

4.5.3. Silício amorfo

O silício amorfo não configura uma estrutura cristalina uniforme e por isso apresenta um arranjo desorganizado. Sua estrutura contém várias ligações pendentes, que criam buracos. Esses buracos se reorganizam com os elétrons livres e afetam a circulação, pela célula, de corrente. Em vista disso, realiza-se a hidrogenação do silício amorfo, de modo que o hidrogênio procure preencher os buracos, reduzindo a quantidade de ligações pendentes e facilitando a passagem dos elétrons pela célula. A eficiência energética deste tipo de célula está entre 6 a 7% (MIRANDA, 2015). A Fig 8 ilustra a estrutura da célula de silício amorfo.

Figura 8 – Estrutura da célula de silício amorfo



Fonte: Revista Virtual de Química ISSN 1984-6835, 2015.

O silício amorfo é uma das três cadeias de filmes finos ao lado do disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) (CEPEL & CRESEB, 2014).

4.5.4. Células orgânicas

Segundo a Cepel & Creseb (2014), o desenvolvimento da tecnologia existente nas células orgânicas consiste na mais atual para os sistemas fotovoltaicos, mas permanece em fase de pesquisa e progresso, teste e fabricação em baixa escala.

Esta inovação se fundamenta na aplicação de um semicondutor orgânico, que é responsável por captação de luminosidade, geração, distribuição e deslocamento de

cargas. Poucos destes componentes são processados pela mistura de um polímero condutor e um derivado do fulereno. (ALVES, 2011).

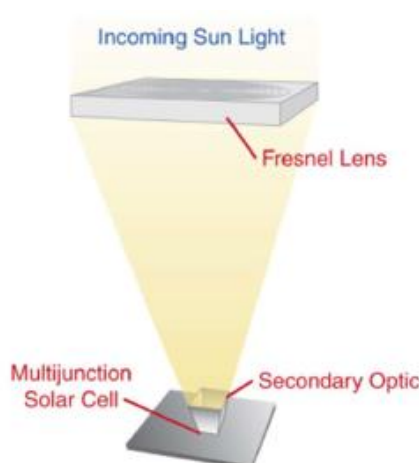
Conforme Alves (2011), este material possui uma utilidade, que pode ser analisada com uma perspectiva promissora para conversão de energia elétrica em solar por um valor acessível.

4.6. Sistema com concentração óptica

As tecnologias dos sistemas fotovoltaicos com alta concentração óptica (HCPV) surgem como uma forma alternativa para os sistemas fotovoltaicos convencionais. Os elementos utilizados neste sistema são ópticos, sendo que eles aumentam a densidade da incidência da potência luminosa nas células, pois apresentam uma área menor para a captação da radiação (ALGORA & STOLLE, 2016).

Estes elementos podem ser lentes, espelhos ou uma combinação dos dois, de maneira em que a célula ao ser projetada para o nível de radiância adequado receberá no foco essa radiação e necessariamente precisará ser ligado termicamente a um dissipador de calor para descartar a energia térmica. É de extrema importância que a ligação térmica com o dissipador tenha uma boa isolamento elétrica (GOUVEIA, 2015).

Figura 9 – Princípio de concentração fotovoltaica



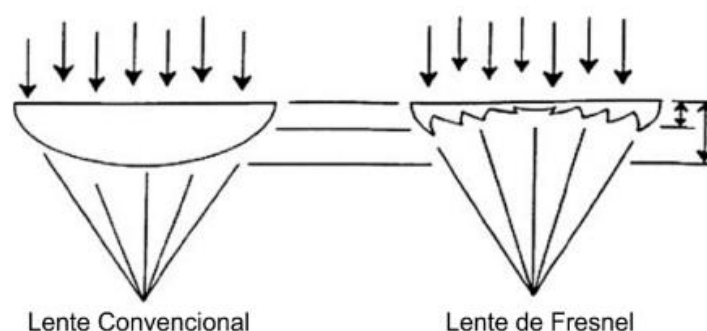
Fonte: EPRI, 2010

A tecnologia com concentração aproveita a radiação normal direta para gerar energia, assim a radiação difusa não é coletada, sendo uma desvantagem do sistema,

só que por apresentar seguimento ao Sol, essa desvantagem passa a ser compensada pela orientação constante do coletor (GOUVEIA, 2015).

Com o intuito de melhorar o desempenho dos sistemas ópticos, a configuração que é utilizada constitui da etapa primária que é a concentradora e a etapa secundária que é a coletora. Então, os equipamentos ópticos primários mais utilizados são as lentes de Fresnel justamente por serem lentes finas em compara com as lentes convencionais. Comercialmente são usadas lentes feitas de acrílico e vidro, que são mais econômicas que os materiais semicondutores (URIBE, 2015).

Figura 10 – Comparação entre lentes de Fresnel e Convencionais



Fonte: PINTO, 2016.

Outros materiais estão sendo estudados para a fabricação das lentes de Fresnel para os sistemas ópticos primários, que dentre eles estão o PMMA (*Poly Methyl Methacrilato*) e o SOG (*Silicon Over Glass* - Silicone sobre vidro), com o intuito de avaliar o comportamento e vantagens destes materiais com os usados comumente. (KURTZ, 2012).

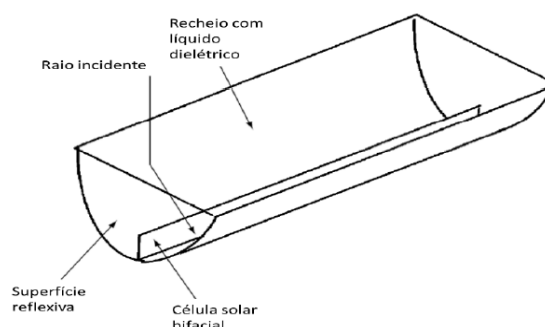
A segunda etapa, que consiste no sistema óptico secundário que tem como função o aumento da concentração a partir do ângulo de aceitação, sendo que a medida que aumenta o ângulo menores são as exigências da precisão do sistema de rastreamento, com isso precisa se investir em um alta tecnologia de seguimento, resultando em gastos maiores (URIBE, 2015).

4.6.1. Sistema de seguimento

A exigência de rastreamento para os HCPV varia de acordo com os níveis de concentração (baixo, médio ou alto), que podem ser divididos em sistemas estáticos, com um eixo ou dois eixos.

Os sistemas estáticos possuem baixa concentração e uma instalação simples e tem como vantagem não ter a presença de partes móveis para o sistema de seguimento. No entanto, este tipo de sistema na escala comercial e industrial não é tão disseminado por conta de seus custos serem altos no incremento de materiais ópticos, de forma que não são compensa o aumento na geração de energia elétrica (ALGORA & STOLLE, 2016).

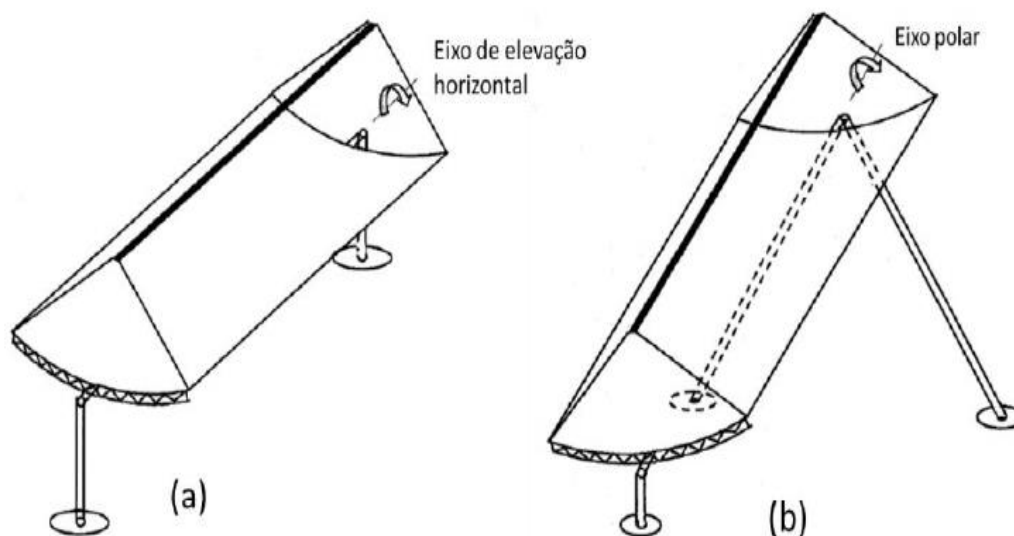
Figura 11 – Sistema concentrador estático.



Fonte: LUQUE E HEGEDUS, 2011.

Outra forma de se utilizar o sistema de seguimento para baixo índice de concentração é apenas em um eixo com espelhos ou com alguns modelos de lente linear com restrição ao ângulo. Eles apresentam vantagem por serem simples na hora de se instalar, possuem manutenção fácil e com relação a velocidade do vento possuem baixo perfil. Sua característica é que apresentam rotação tanto no eixo horizontal ou uma rotação em relação ao ângulo polar (URIBE, 2015).

Figura 12 – Sistema com seguimento de um eixo



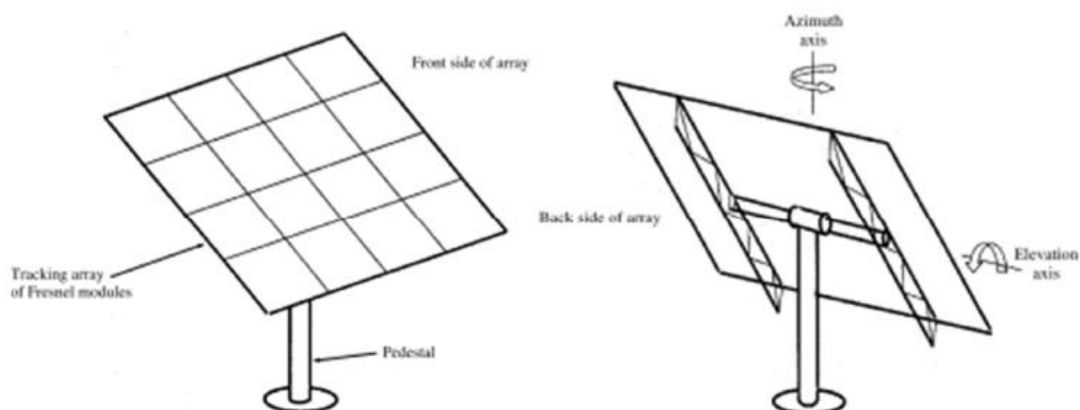
(a) Rotação no eixo horizontal

(b) Rotação no eixo polar

Fonte: LUQUE E HEGEDUS, 2011.

Já para sistemas HCPV a preferência é utilizar rastreadores solar com dois eixos, fundamental por conta do alto nível de concentração. Comumente este tipo de sistema utiliza lentes do tipo ponto foco, que exige uma alta precisão de rastreamento para está sempre voltado em sentido ao Sol. Podendo ser dividido em sistema de seguimento em pedestais, estruturas com giro ou mesa giratória (URIBE, 2015).

Figura 13 – Rastreador com dois eixos do tipo pedestal

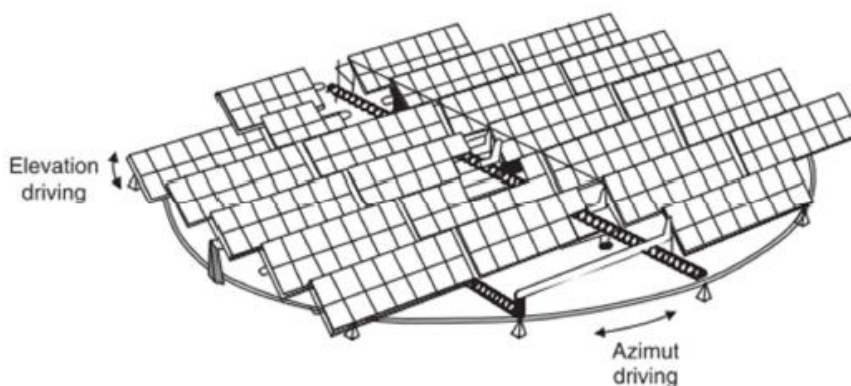


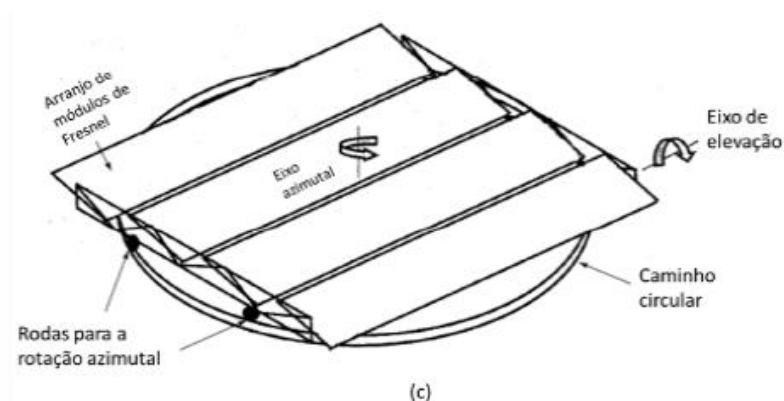
Fonte: ALGORE & STOLLE, 2016

No sistema com pedestal, os módulos ficam sobre um pedestal com uma estrutura plana de apoio, onde um sistema de engrenagens – a qual movimenta os painéis tanto de forma horizontal quanto vertical - faz o rastreamento do Sol. É de simples instalação, pois só precisa fixar o tubo em concreto, no entanto por produzir efeitos mecânicos - causados pelos ventos – que são transferidos ao motor em forma de torque, através do uso das engrenagens, como é possível observar na Figura 13 (URIBE, 2015)

O sistema com estrutura de giro, podendo ser mesa girante ou tipo rolo, possui vantagem sobre os outros tipos, tendo em vista que eles são os menos afetados pelo vento. Sendo que os do tipo mesa girante requer maior cuidado na hora da instalação das partes mecânicas, pois necessitam de um bom espaço construído sobre o solo (KURTZ, 2012).

Figura 14 – Modelo do sistema de rastreamento com dois eixos tipo mesa girante

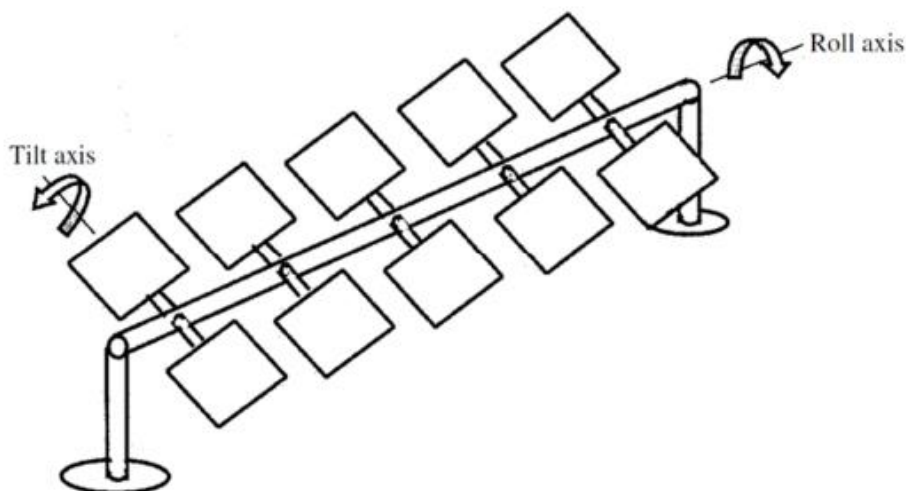




Fonte: LUQUE E HELGEDUS, 2011.

Enquanto que o tipo rolo tem mais rolamentos e ligações mecânicas, que se torna uma dificuldade na hora da instalação quando se compara com os outros tipos. Então, os sistemas com possuem mais ligações e rolamentos, além de precisar nivelar as estruturas de suporte para alinhar os painéis (LUQUE E HELGEDUS, 2011).

Figura 15 – Sistema de rastreamento de dois eixos tipo rolo



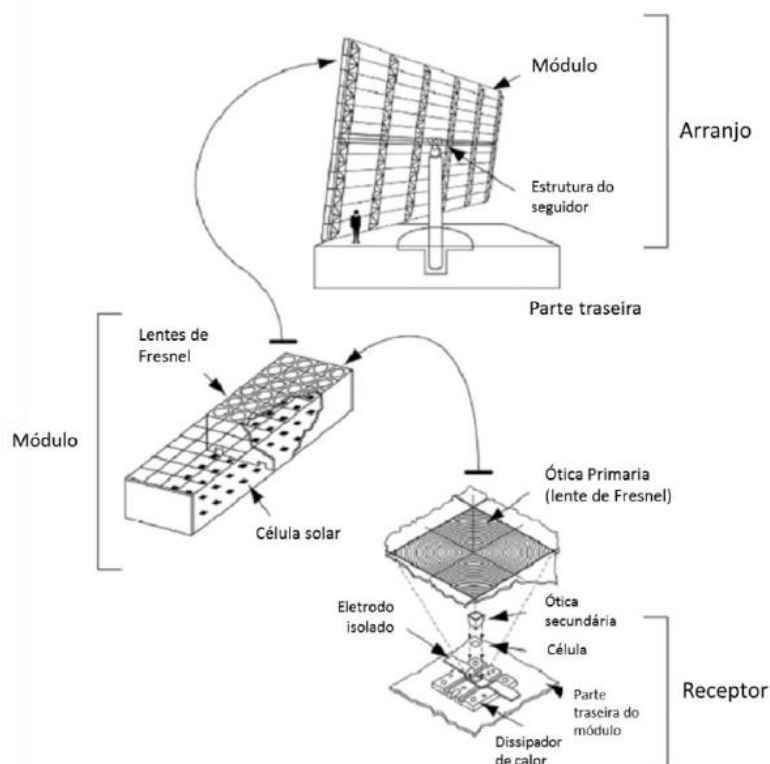
Fonte: LUQUE E HELGEDUS, 2011.

Em geral, os sistemas com concentração óptica apresentam um arranjo de módulos com alta concentração conectada eletricamente entre si e um Sistema de Suporte Auxiliar (SSA). O painel fotovoltaico apresenta na sua estrutura um conjunto de receptores fotovoltaicos, pelos elementos de concentração (sistema óptico primário e sistema óptico secundário opcional) e os elementos do casco. Por outro lado, o

receptor é formado por células de multijunção, o diodo de by pass e o dissipador de calor. (PÉREZ-HIGUERAS *et al.*, 2011)

No caso do SSA, ele apresenta um mecanismo de seguimento, a base das placas, as ligações elétricas, sensores, aparelhos de controle, sistema para captura de dados e inversores. (ALMEIDA, 2012). A Fig 16 ilustra partes principais dos módulos fotovoltaicos com concentração.

Figura 16 – Partes principais dos módulos fotovoltaicos, composição dos módulos e do suporte auxiliar.



Fonte: Adaptado da norma IEC62108 *apud* GARCÍA-DOMINGO, 2014.

4.6.2. Células de múltiplas junções

Os módulos fotovoltaicos estão a cada momento procurando superar barreiras tanto relacionadas ao seu custo/investimento como em relação à eficiência. Em relação à operação da célula fotovoltaica, principalmente com concentração,

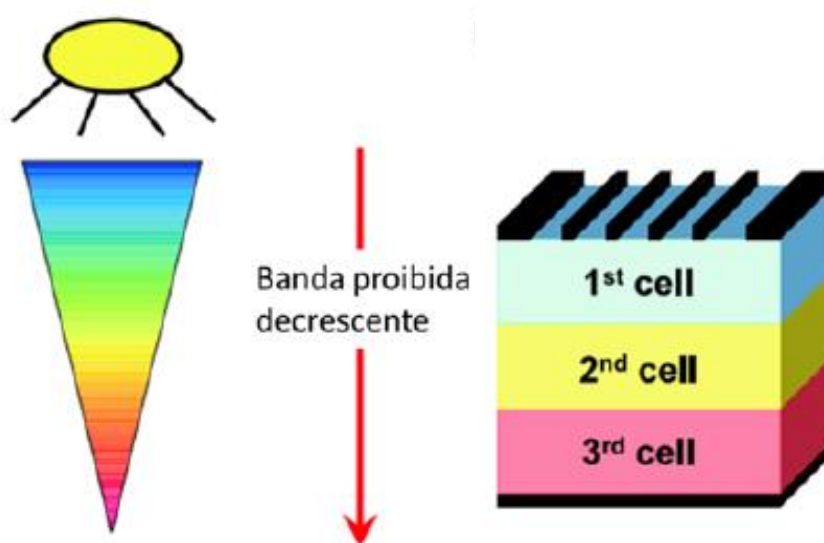
apresentam vantagem de células menores poderem produzir uma quantidade de energia proporcional aos sistemas convencionais. A partir do desenvolvimento da tecnologia surgem as células de múltiplas junções como uma nova perspectiva para os sistemas com concentração (LUQUE E HELGEDUS, 2011)

As células de múltiplas junções são feitas por inúmeras camadas de componentes semicondutores (geralmente dos grupos III e V presentes na tabela periódica) usados em um arranjo cristalino, em que a cada faixa da célula possa ser aproveitada pedaços do espectro eletromagnético da radiação solar em uma parte específica correspondente ao seu comprimento de onda e aumentar a capacidade de energia gerada a cada unidade de área (LUQUE E HELGEDUS, 2011).

Na sua composição tem vários semicondutores organizados em camadas para compor essa célula de múltiplas junções, os mais utilizados são GaInP / GaInAs / Ge, pois vem apresentando os melhores resultados no seu desempenho. A célula tem um terminal positivo e negativo, que são conectados separadamente (SAYEGH, 2017).

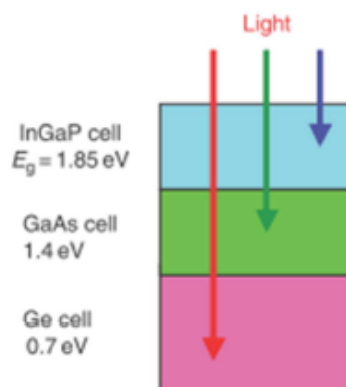
O material semicondutor é depositado um sobre o outro em camadas numa superfície, que são interligados em série por um diodo. Assim, se cria um único arranjo cristalino com apenas um terminal positivo e um terminal negativo (SAYEGH, 2017).

Figura 17 – Células de tripla junção – múltiplas junções



Fonte: URIBE, 2015.

Figura 18 – Esquema de uma célula de múltipla junção.



Fonte: SAYEGH, 2017

A radiação solar quando incide sobre a célula de múltipla junção é dividida em várias regiões do espectro, onde cada uma delas é transformada em energia elétrica de acordo com a correspondência da sua banda de energia. Os fótons que apresentam maior energia são absorvidos pelas primeiras camadas, o contrário se aplica também onde os que possuem uma menor energia serão absorvidos pelas camadas inferiores. Logo, a célula consegue aproveitar todo espectro da radiação, tendo uma eficiência maior e reduzindo as perdas térmicas (GOUVEIA, 2015).

O funcionamento das células busca diminuir as perdas por termalização e por transmissão ao ampliar o número de junções do tipo p-n (BETT; DIMROTH; SIEFER, 2007)

.Essas células podem atingir acima de 50% de eficiência, por apresentaram uma resposta e aproveitamento maior que as células convencionais, ou seja, conseguem absorver maiores partes do espectro. Sendo que as células de silício aproveitam em torno de 31% do espectro e a célula de múltipla junção fica em torno de 86%. Assim, essas células de alta eficiência são cada vez menores podendo ficar na escala de centímetros a milímetros de área (GOUVEIA, 2015).

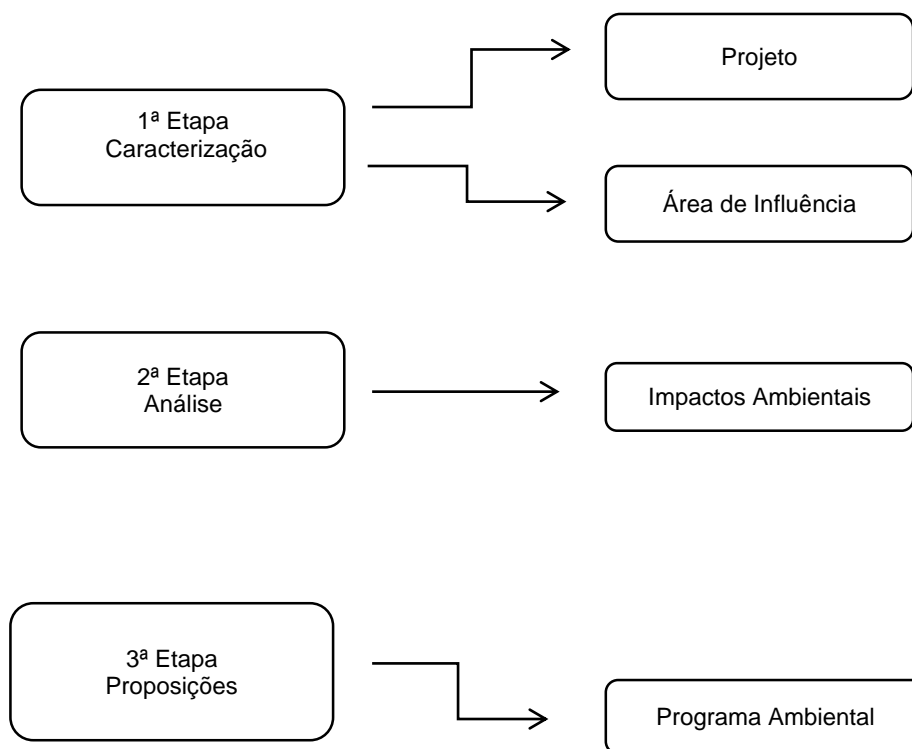
4.7. Questões ambientais

A energia solar é considerada uma fonte renovável e limpa, que não apresenta emissão de gases poluentes – CO_2 , CO – no ambiente contribuindo assim para redução de poluentes na natureza. No entanto, a restrição para a implantação dos

sistemas convencionais está na sua baixa eficiência, que se tem necessidade de grandes quantidades de equipamentos e área para captar uma boa quantidade de energia solar (MME, 2017).

As grandes irradiações solares estão em regiões de pouco desenvolvimento econômico, em que a utilização do espaço pode ajudar e contribuir para o desenvolvimento da área local. Sendo necessário realizar um estudo ambiental para ter a constatação de que se pode ser utilizado à área para determinado fim, como se pode observar no diagrama 1. (MME, 2017)

Diagrama 1 – Processo para realização do estudo ambiental



Fonte: Adaptado do MME, 2017.

5. METODOLOGIA

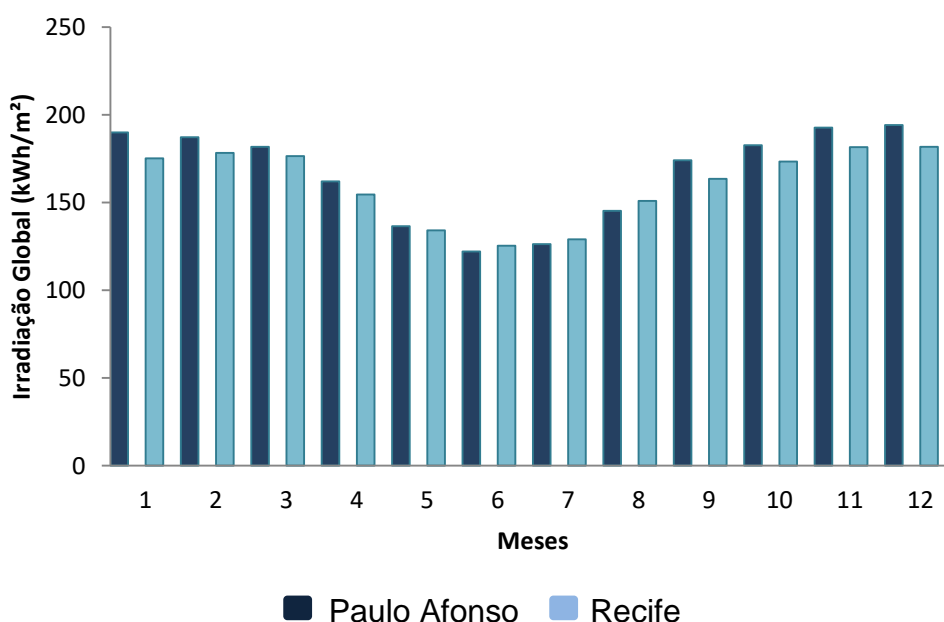
A metodologia empregada neste trabalho visa analisar o comportamento de um sistema com concentração óptica e plano fixo em condições de operação para localidade de Paulo Afonso – BA, através da avaliação das condições meteorológicas, simulação dos sistemas e viabilidade econômica.

5.1. Avaliação dos parâmetros meteorológicos

A avaliação dos diferentes tipos de radiação solar e condições climáticas locais foram retiradas do banco de dados da CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica e INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Isto porque Paulo Afonso não apresenta estação meteorológica com captação para radiação solar.

A CRESESB oferece um banco de dados, que é possível se extrair, durante o período de um ano, os valores de irradiação global ou horizontal. O período utilizado para análise no estudo aqui proposto foi de Janeiro/2018 até Dezembro/2018, tanto para Paulo Afonso – BA como para Recife – PE. Estes dados serão utilizados para o sistema plano fixo, visto que o sistema com concentração óptica utiliza uma parte da irradiação global para geração de energia elétrica.

Gráfico 1 – Irradiação solar global das cidades de Recife e Paulo Afonso.

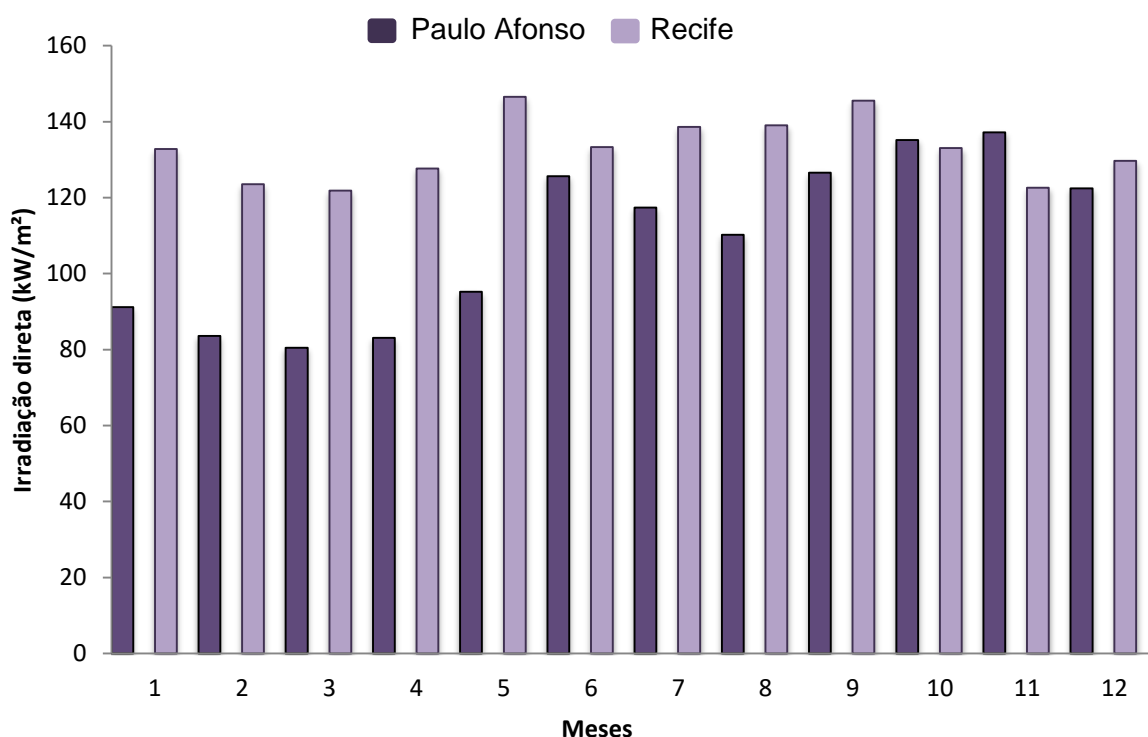


Fonte: Autoria própria, 2019.

A CRESESB não disponibiliza informações de irradiação direta para as localidades estudadas, desse modo foi utilizada outra base de informações. O INMET apresenta a informação de irradiação direta de minuto a minuto, sendo exibidos ao usuário os dados referentes ao período de 365 dias desde o primeiro acesso, em que os dados precisaram ser tratados, pois se tomou como base os dados compreendidos entre 1700 - 2000 medições por mês.

Na central de dados não consta Paulo Afonso – BA, tendo que ser utilizado como referência a cidade de Jeremoabo – BA que fica há 85 km da cidade de Paulo Afonso – BA. Foi necessário realizar um tratamento nos dados coletados para a retirada dos valores que não estivessem dentro dos padrões, usando como referência a média mensal para o período previsto de 01 de Abril/2018 até 31 de Março/2019. Os dados coletados precisaram ser tratados, pois se tomou como base em torno de 2000 medições por mês.

Gráfico 2 – Irradiação solar direta das cidades de Recife e Paulo Afonso.

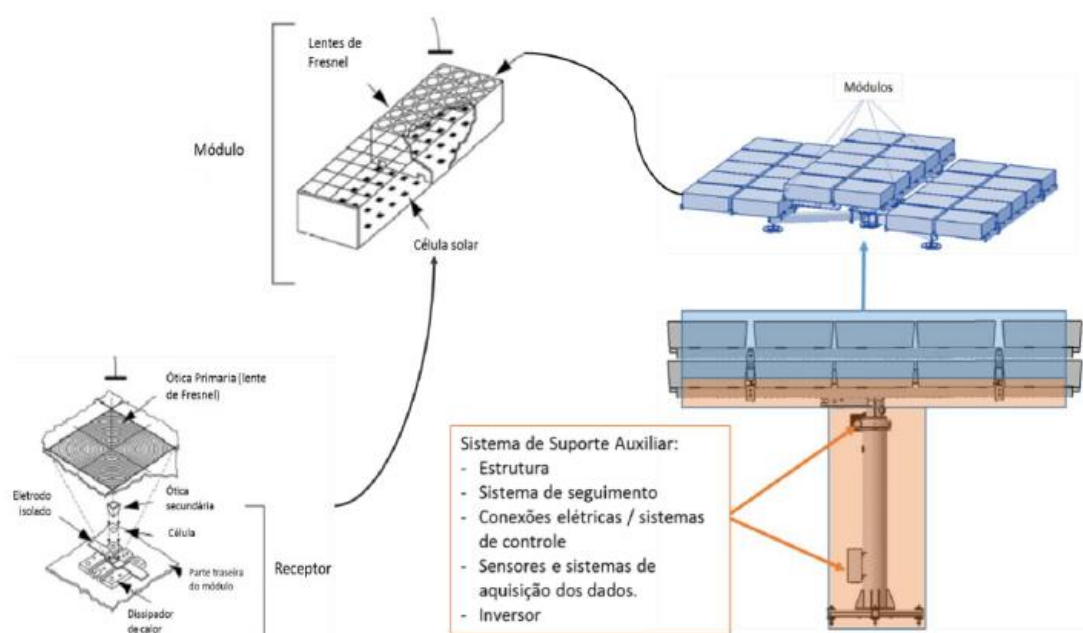


Fonte: Autoria própria, 2019

5.2. Simulação dos sistemas de microgeração fotovoltaica

Com os dados de irradiação global e direta todos tratados de forma que estivessem aptos a serem utilizados no software foi iniciado o primeiro teste. A princípio foi tomado como base um sistema com concentração localizado na UFPE – Campus Recife, que apresenta a potência do sistema de 10 kWp.

Figura 19 – Esquema do sistema HCPV na UFPE – Campus Recife



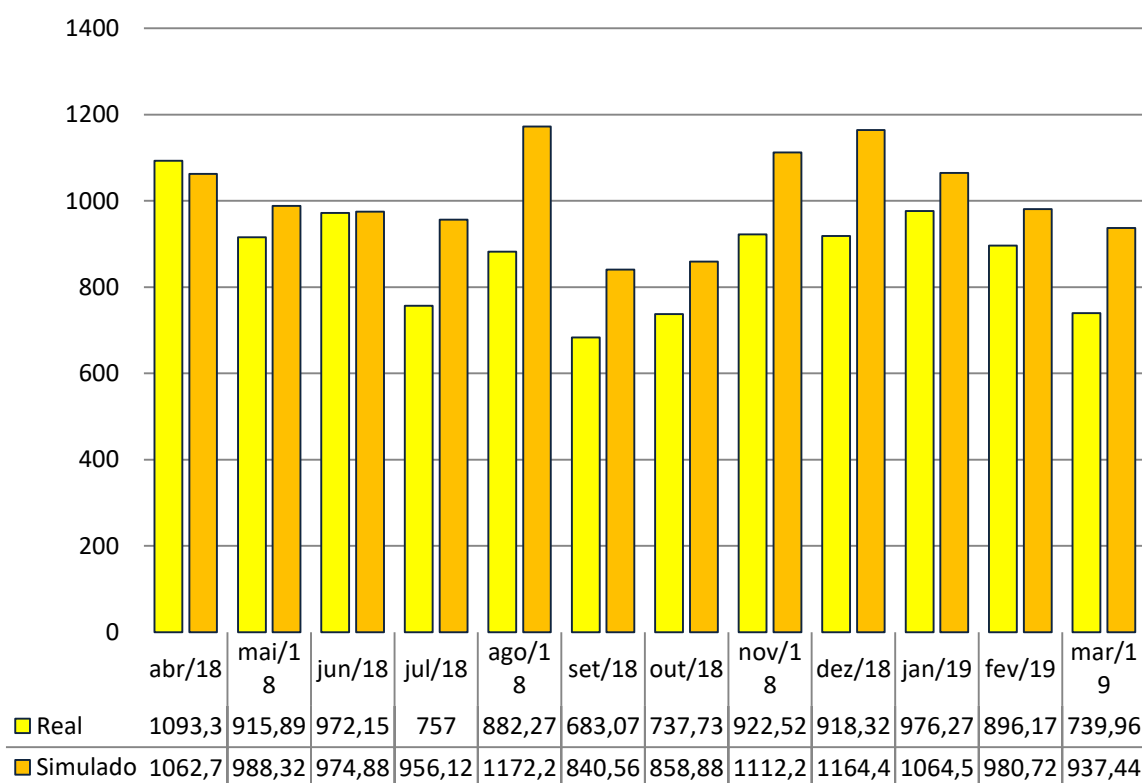
Fonte: URIBE, 2015.

Essa estação apresenta um banco de dados, nos quais foram medidos e computados ao longo da sua geração que é de cinco em cinco minutos e esses dados foram coletados e tratados para comparar e validar a simulação. Tomou-se como base a potência do sistema de Recife para realizar os estudos de simulação e os dados coletados do INMET de irradiação direta para os sistemas com concentração.

Utilizou-se o software *Retscreen Expert 2017* para fazer a simulação do sistema com concentração, o software foi desenvolvido pelo governo do Canadá e já apresenta um banco de dados da NASA, para a localidade de Recife – PE.

Posteriormente foram inseridos os dados coletados e medidos de irradiação direta, visto que o sistema de dados do próprio software não apresenta esse tipo de informação. A apresentação dos dados foi dividida em duas etapas, sendo a primeira para verificar a validade da simulação do sistema com os dados para Recife e a outra para comparar com a geração medida.

Gráfico 3 – Comparação de geração de energia elétrica entre os dados medidos e simulados para localidade de Recife – PE.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Através da equação (1) foi estimada uma geração de energia elétrica para o sistema com concentração, onde:

$$E \text{ (kWh)} = Pot \text{ (kWp)} * DNI * FD \quad (1)$$

E = Energia gerada, dado em kWh

Pot = Potência do sistema, dada em kWp

DNI = Irradiação Direta Normal, dada em kW/m²

FD = Fator de depreciação

Tendo como consideração o fator de depreciação das placas solares que tem uma faixa estimada de 80% ou 0,8. Desse modo, a simulação tende pela literatura a se aproximar cada vez mais do modelo real medido com a consideração deste fator.

Uma vez que, os resultados da simulação estiveram próximos dos dados coletados na estação da UFPE, pode-se validá-los e utilizar os mesmos parâmetros para a localidade de Paulo Afonso – BA. Para o sistema plano deverá ser utilizada a irradiação global ou horizontal para se estimar a geração de energia, através da equação (2), sendo posteriormente realizada uma organização dos dados em quadros e gráficos.

$$E \text{ (kWh)} = Pot \text{ (kWp)} * GHI * FD \quad (2)$$

E = Energia gerada, dado em kWh

Pot = Potência do sistema, dada em kWp

GHI = Irradiação Global, dada em kW/m²

FD = Fator de depreciação

5.3. Comparação do sistema HCPV e o sistema plano fixo

Com os dados climáticos já tratados e a simulação validada para a localidade de Paulo Afonso, tanto para a geração de energia elétrica para um sistema com concentração como para um sistema plano convencional. De maneira a poder comparar os dois tipos de sistema foi estabelecido uma potência de 10 kWp, visto que foi tomado como parâmetro o sistema com concentração de Recife.

A comparação entre os dois sistemas foi realizada através da análise da estimativa de geração de energia elétrica pelo software entre o período estipulado, a saber, entre 01/04/2018 e 31/03/2019, tanto para o sistema plano como para o sistema com concentração óptica. Assim, através da estimativa da geração de energia, fator de capacidade e parâmetro de desempenho foi possível avaliar as características dos sistemas operando simultaneamente e com suas respectivas condições meteorológicas.

O índice de desempenho é considerado um parâmetro para medir a qualidade do sistema em questão, onde será visto o rendimento total e o rendimento esperado. Pode ser calculado através da equação (3), onde:

$$PR = \frac{Eg * Gs}{Pn * Hs} \quad (3)$$

Eg = Energia gerada pelo sistema, dado em kWh

Gs = Irradiância nas condições padrão de teste – 1 kW/m²

Pn = Potência nominal do sistema, em kWp

Hs = Irradiância utilizada no plano, em kW/m²

O fator de capacidade é capacidade que o sistema tem de operar na seu potencial nominal no período de um dia, ou seja, vinte e quatro horas. Através da equação (4), o fator de capacidade pode ser calculado onde:

$$FC (\%) = \frac{Et}{Pn * 24h * 365 \text{ dias}} * 100 \quad (4)$$

Et = Energia gerada pelo sistema em um ano, dado em kWh

Pn = Potência nominal do sistema, em kWp

5.4. Análise econômica

A análise econômica para os tipos de sistemas comparados se fez com algumas considerações para a localidade de Paulo Afonso – BA. Será analisado o Valor Presente Líquido (VPL), Payback e a Taxa Interna de Retorno (TIR) do investimento aos sistemas para se tomar como base a viabilidade econômica de cada um, através do software livre *Retscreen Expert 2017* que também faz análise econômica,

.O Valor Presente Líquido é um dos métodos utilizados na engenharia econômica para avaliar a viabilidade financeira de um projeto ou investimento. Sendo que ele é definido como o somatório dos valores presentes das entradas por ano, assim desconta do valor inicial investido à medida que for sendo dadas as entradas ao ano. Pode-se calcular o VPL através da equação (5), onde:

$$VPL = -CF_0 + \sum_{n=0}^n \frac{CF_j}{(1+i)^n} \quad (5)$$

CF_0 = Investimento inicial do sistema fotovoltaico

CF_j = Parcelas acumulados da geração de energia durante o ano

n = Período de tempo, em anos

i = Taxa de juros anuais

Adotou-se o valor da tarifa da concessionária local – COELBA – no mês de março que era de R\$ 0,79/kWh e ficou fixo para os meses restantes para analisar de forma conjunta, sendo levado em consideração que são valores estimados.

Além disso, tomou-se como referência a taxa de juros anuais do Banco do Nordeste, que apresenta um programa de financiamento para os sistemas fotovoltaicos da cidade, sendo assim sua taxa de juros é de 1,6751% por ano. Tendo em vista que a cada mês esse valor pode sofrer alteração do próprio banco. O período de análise será de 25 anos, por ser o tempo de vida útil do sistema fotovoltaico convencional.

A Taxa Interna de Retorno é um parâmetro utilizado para se observar qual o percentual de retorno do investimento de um projeto para determinado investidor. Dessa forma, pode-se calcular o TIR de acordo com a equação (6), onde:

$$-CF_0 \sum_{n=0}^n \frac{CF_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (6)$$

CF_0 = Investimento inicial do sistema fotovoltaico

CF_n = Parcelas acumulados da geração de energia durante o ano

TIR = Taxa interna de retorno, em porcentagem(%)

O payback é a estimativa de tempo de quanto tempo levará para o investidor começar a recuperar o dinheiro que foi aplicado. De acordo com a equação (7), pode ser calculado da seguinte maneira:

$$PB = \frac{CF_0}{Cpa} \quad (7)$$

CF_0 = Investimento inicial do sistema fotovoltaico

Cpa = Investimento por ano

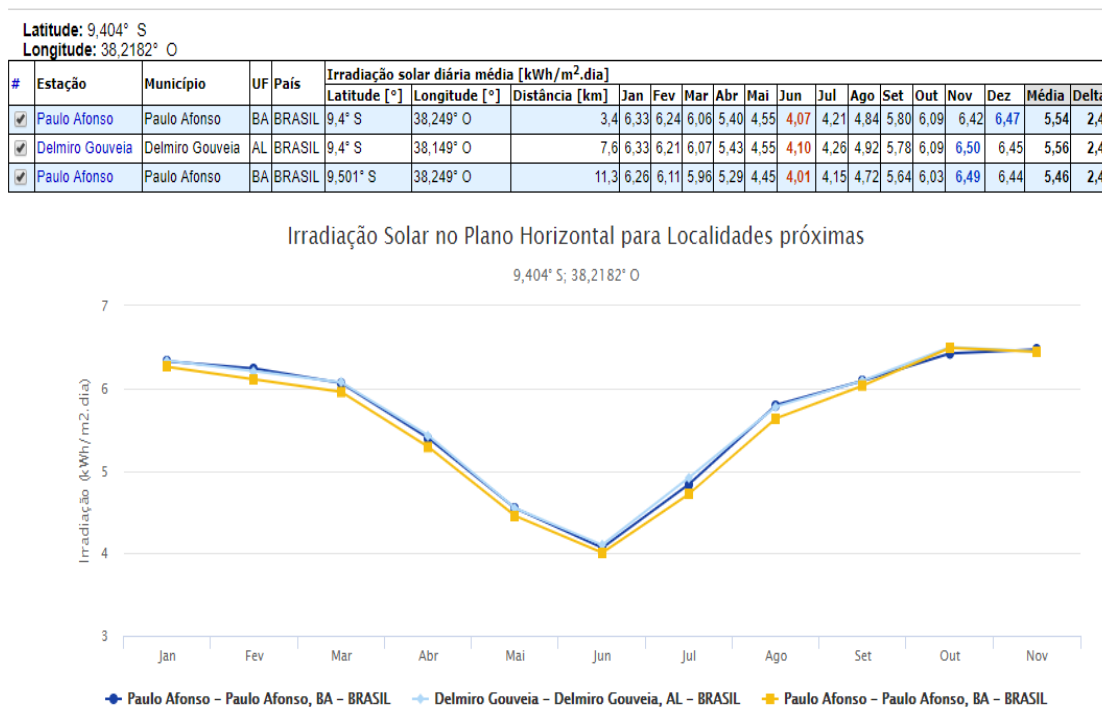
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para fins didáticos, o sistema de micro geração fotovoltaico simulado para a localidade de Paulo Afonso tendo como referência o sistema de concentração da UFPE – Campus Recife será analisado e discutido nos subtópicos abaixo:

6.1. Condições Meteorológicas

A cidade de Paulo Afonso - BA, local da simulação para os dados coletados, localiza - se geograficamente nas coordenadas 09° 24' 22"S e 38° 12' 53" W. Apresenta, segundo a CRESESB, um índice de irradiação solar diária média horizontal de 5,54 kW/m², como ilustra a Figura 20. Tendo em vista que a cidade se situa no interior da Bahia e segundo a NASA o grau de precipitação é de 575,47 mm anual, sendo relativamente pequeno com relação a outras cidades. Dessa forma, a cidade apresenta durante o ano uma maior incidência de raios solares sem ter muita variação climática.

Figura 20 – Irradiação solar média diária em Paulo Afonso - BA.



Fonte: CRESESB, 2019.

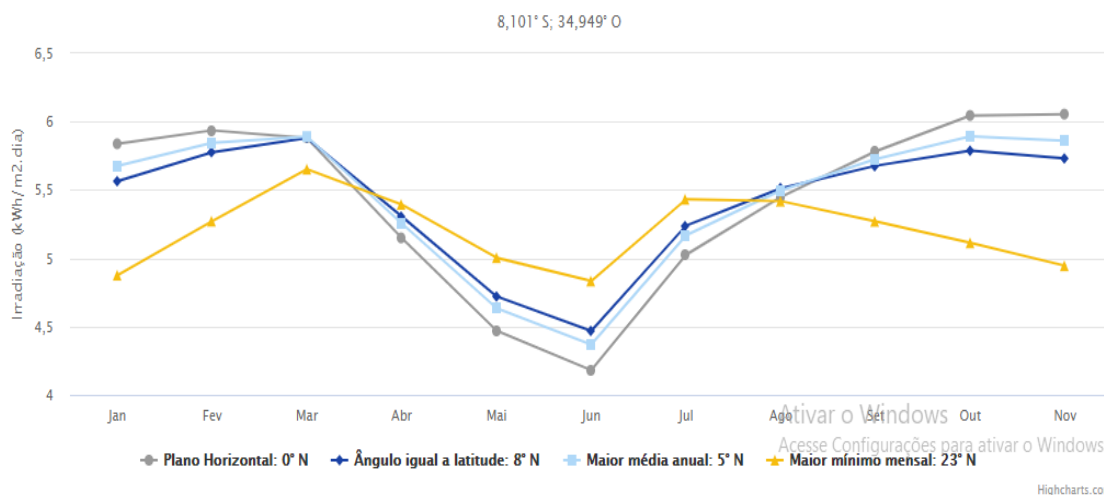
A cidade de Recife está localizada geograficamente a 8° 3' 15" S "e 34° 52' 53". Segundo a CRESESB tem irradiação média diária horizontal de 5,34 kW/m², como ilustra a Figura 21, que em relação a Paulo Afonso tem um valor de 0,20 kW/m² a menos. Com relação a precipitação tem anualmente uma faixa de 1517,70 mm. Dessa forma, a cidade do Recife chove bem mais que Paulo Afonso, aproximadamente três vezes mais. Isso para um sistema fotovoltaico se torna um fator negativo para geração de energia elétrica.

Figura 21 – Irradiação solar média diária em Recife - PE.

Estação: Recife
Município: Recife, PE - BRASIL
Latitude: 8,101° S
Longitude: 34,949° O
Distância do ponto de ref. (8,05428° S; 34,8813° O): 9,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,84	5,94	5,88	5,15	4,47	4,18	4,30	5,03	5,45	5,78	6,05	6,06	5,34	1,87
✓	Ângulo igual a latitude	8° N	5,56	5,78	5,88	5,31	4,72	4,47	4,57	5,24	5,51	5,68	5,79	5,73	5,35	1,41
✓	Maior média anual	5° N	5,68	5,85	5,89	5,26	4,63	4,37	4,48	5,17	5,50	5,73	5,89	5,86	5,36	1,52
✓	Maior mínimo mensal	23° N	4,88	5,27	5,65	5,39	5,00	4,83	4,90	5,43	5,42	5,27	5,11	4,94	5,18	,82

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Recife-Recife, PE-BRASIL



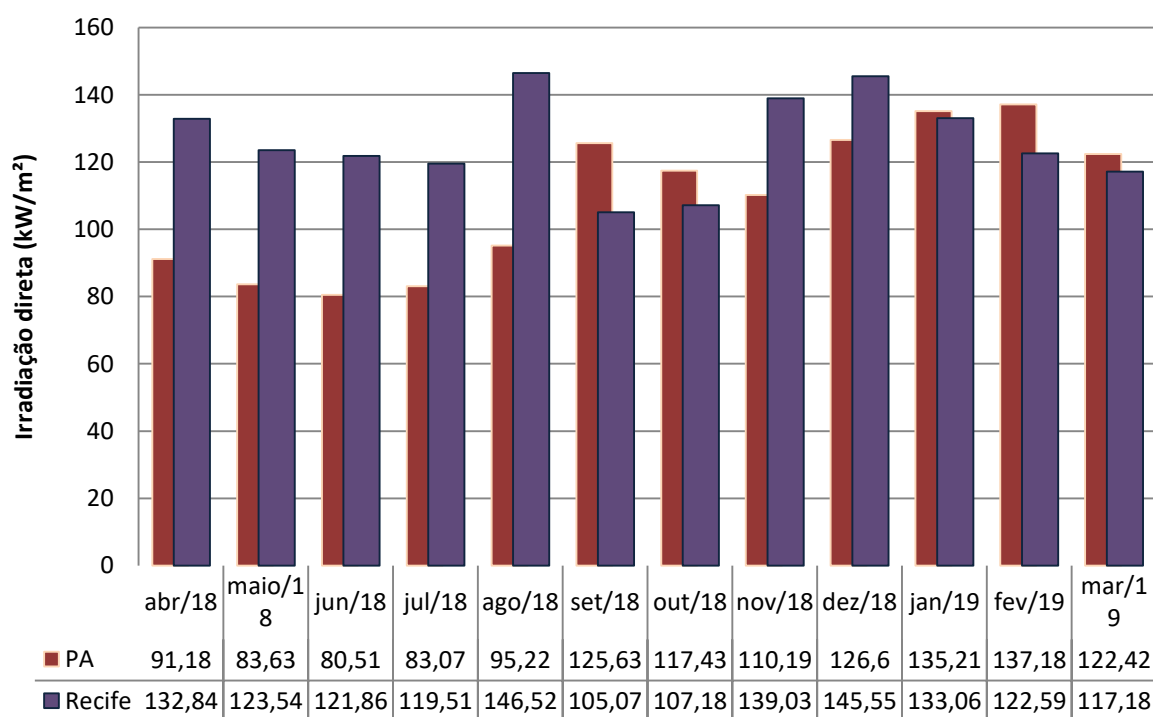
Fonte: CRESESB, 2019.

Dessa forma, Paulo Afonso apresenta uma irradiação média diária horizontal maior que a cidade de Recife, além de também mostrar uma quantidade menor de chuva durante o ano. No entanto, há outro fator que contribui para uma melhor eficiência dos painéis que é o fenômeno do céu claro.

A cidade de Paulo Afonso é caracterizada pela escassez e irregularidade nas precipitações da chuva, além de expressar pouca nebulosidade, ou seja, poucas nuvens no céu. Essas nuvens são fatores de interferência para a radiação solar, seja ela direta ou global, que chegam aos módulos. Sendo que a radiação global ou horizontal é caracterizada por ser composta da radiação direta e difusa. Tal fato é que a cidade de Paulo Afonso tem o céu claro, sem muitas nuvens e isso propicia um melhor desempenho dos sistemas de micro geração.

Em relação à cidade de Recife, que tem muitas indústrias e prédios se percebe maior emissão de gases poluentes, que retém e dificultam a passagem de luminosidade.

Gráfico 4 – Radiação direta das cidades de Paulo Afonso e Recife.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A radiação direta é utilizada nos sistemas de concentração óptica, de modo que ela é uma das componentes da radiação global utilizada nos sistemas planos fixos.

Os dados referentes ao gráfico 4 foram extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir do dia 01/04/2018 até o dia 31/03/2019 sendo assim um estudo de um ano para observar a média anual de radiação direta das duas cidades.

Comparando os resultados obtidos entre as duas cidades, pode-se notar que a irradiância direta da cidade de Recife é superior em praticamente todos os meses, exceto no mês de Janeiro/2019 e Fevereiro/2019 em que Paulo Afonso teve uma irradiância de 135,21 kW/m² e 137,18 kW/m², respectivamente. A média de irradiância anual para Paulo Afonso é de 109,02 kW/m², enquanto que a cidade de Recife tem uma média de 132,86 kW/m², com uma diferença anual de 23,84 kW/m².

Tendo em vista, que Paulo Afonso apresenta menos nebulosidade e emissão de gases poluentes que a cidade de Recife, o resultado previsto para a irradiância direta deveria ser maior para este município. No entanto, a cidade do sertão baiano é localizada em uma ilha com grande incidência solar, mas que tem o complexo hidrelétrico da CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) ao seu redor, sendo evidente o processo contínuo de evaporação da água, de modo que esse fenômeno pode explicar retenção da irradiação direta. Assim, nos meses chuvosos ocorre a agregação de todos esses fatores, que contribuem para a baixa irradiação direta nesses meses.

Dessa forma, o sistema com concentração óptica tem maior aproveitamento na cidade do Recife, mas a cidade de Paulo Afonso tem potencial para utilizar o sistema em determinadas localidades.

6.2. Sistema com concentração óptica

Tendo como base um sistema de concentração de 10 kWp, localizado na UFPE – Campus Recife, serão discutidos os resultados obtidos e comparados com a simulação para as localidades de Paulo Afonso e Recife.

No quadro 1, pode-se observar que os dados coletados variaram entre abril/2018 e março/2019. O pico de energia gerada pelo sistema foi de 1097,44 kWh, de maneira que poucos meses estiveram próximos dessa margem. Entre abril/2018 e agosto/2018 se tem o pior índice de geração de energia, devido às mudanças climáticas, no caso os meses que mais chovem e outros fatores como vapor d'água, CH₄ e CO₂ provocando assim uma diminuição considerável na geração de energia elétrica. A média anual de energia gerada para a localidade de Paulo Afonso é de 872,18 kWh.

Quadro 1 – Sistema com concentração (Paulo Afonso/BA)

SISTEMA COM CONCENTRAÇÃO (10 kWp) - PAULO AFONSO/BA			
MESES/A NO	RADIAÇÃO DIRETA (kW/m²)	FATOR DE DEPRECIÇÃO	QUANT. DE ENERGIA GERADA (kWh)
abr/18	91,18	0,8	729,44
mai/18	83,63	0,8	669,04
jun/18	80,51	0,8	644,08
jul/18	83,07	0,8	664,56
ago/18	95,22	0,8	761,76
set/18	125,63	0,8	1005,04
out/18	117,43	0,8	939,44
nov/18	110,19	0,8	881,52
dez/18	126,60	0,8	1012,80
jan/19	135,21	0,8	1081,68
fev/19	137,18	0,8	1097,44
mar/19	122,42	0,8	979,36

Fonte: Autoria própria, 2019.

Quadro 2 – Sistema com concentração (Recife/PE)

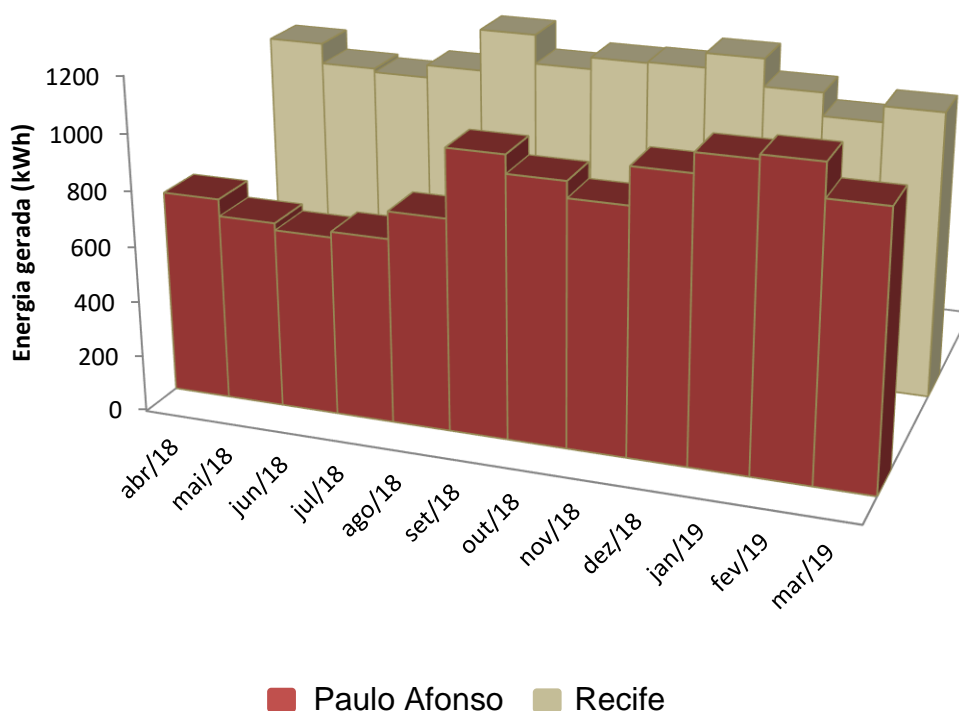
SISTEMA COM CONCENTRAÇÃO (10 kWp) - PAULO AFONSO/BA			
MESES/A NO	RADIAÇÃO DIRETA (kW/m²)	FATOR DE DEPRECIÇÃO	QUANT. DE ENERGIA GERADA (kWh)
abr/18	132,84	0,8	1062,72
mai/18	123,54	0,8	988,32
jun/18	121,86	0,8	974,88
jul/18	119,51	0,8	956,12
ago/18	146,52	0,8	1172,16
set/18	105,07	0,8	840,56
out/18	107,18	0,8	858,88
nov/18	139,02	0,8	1112,20
dez/18	145,55	0,8	1164,40
jan/19	133,06	0,8	1064,48
fev/19	122,59	0,8	980,72
mar/19	117,18	0,8	937,44

Fonte: Autoria própria, 2019.

Em Recife, a radiação direta não apresenta grandes variações entre os meses analisados. Desse modo é possível notar que a estimativa de energia gerada está muito próximo durante os meses, de forma em que as mudanças climáticas não prejudicam na geração do sistema. O pico foi no mês de agosto/2018 e obteve 1172,16 kWh, sendo maior que o apresentado para localidade de Paulo Afonso, visto que o mês de agosto em Paulo Afonso obteve 761,76 kWh por conta das mudanças climáticas decorrentes na cidade.

A média anual de geração de energia para o sistema de concentração na cidade de Recife é de 1062,82 kWh, que em relação à cidade de Paulo Afonso tem uma produção superior de 17,94 % por ano. Tornando-se assim uma perda considerável para o sistema, que ao ser implantado na região de Paulo Afonso não mantém uma conformidade na radiação solar direta.

Gráfico 5 – Estimativa de energia gerada em kWh em Paulo Afonso e Recife



Fonte: Autoria própria, 2019.

Em relação à energia gerada (kWh) pelo sistema com concentração nas duas localidades é possível ver que Recife apresenta sempre uma geração maior que Paulo Afonso em praticamente todos os meses. Deve-se focar que nos meses chuvosos, entre abril e agosto, o índice de geração em Paulo Afonso é muito baixo comparado a Recife que se mantém constante em relação aos outros meses.

A partir de setembro, o sistema instalado em Paulo Afonso começa a se equivaler ao de Recife tendo sete meses de geração com bom rendimento e próximo ao da capital pernambucana.

Assim, o sistema com concentração óptica, mesmo com parte da energia sendo usada para alimentar sistema de rastreamento que é em base de 24 kWh/mês, tem maior eficiência na cidade do Recife, visto que sua geração é constante durante os meses com ou sem chuva. Sendo que o sistema instalado na cidade de Paulo Afonso mesmo com o índice de chuvas menor acaba comprometendo a geração do sistema em 5 meses do ano.

Dessa maneira, Recife apresenta condições meteorológicas mais adequadas para que o sistema com concentração possa gerar maior quantidade de energia elétrica sem apresentar variações, quando comparado com a cidade de Paulo Afonso.

6.3. Sistema fotovoltaico plano fixo

A região de Paulo Afonso apresenta uma crescente na utilização de sistemas de módulos planos, principalmente para residências. Tendo em vista os dados de radiação horizontal fornecidos pela CRESESB, a tabela abaixo apresenta os resultados obtidos para um sistema de 10 kWp para a localidade citada acima.

Quadro 3 – Simulação para o sistema plano em Paulo Afonso/BA

SISTEMA PLANO CONVENCIONAL (10 kWp) - PAULO AFONSO/BA			
MESES/A NO	RADIAÇÃO GLOBAL (kW/m²)	FATOR DE DEPRECIAÇÃO	QUANT. DE ENERGIA GERADA (kWh)
jan/18	189,90	0,8	1519,20
fev/18	187,20	0,8	1497,60
mar/18	181,80	0,8	1454,40
abr/18	162,00	0,8	1296,00
mai/18	136,50	0,8	1092,00
jun/18	122,10	0,8	976,80
jul/18	126,30	0,8	1010,40
ago/18	145,20	0,8	1161,60
set/18	174,00	0,8	1392,00
out/18	182,70	0,8	1461,60
nov/18	192,60	0,8	1540,80
dez/18	194,10	0,8	1552,80

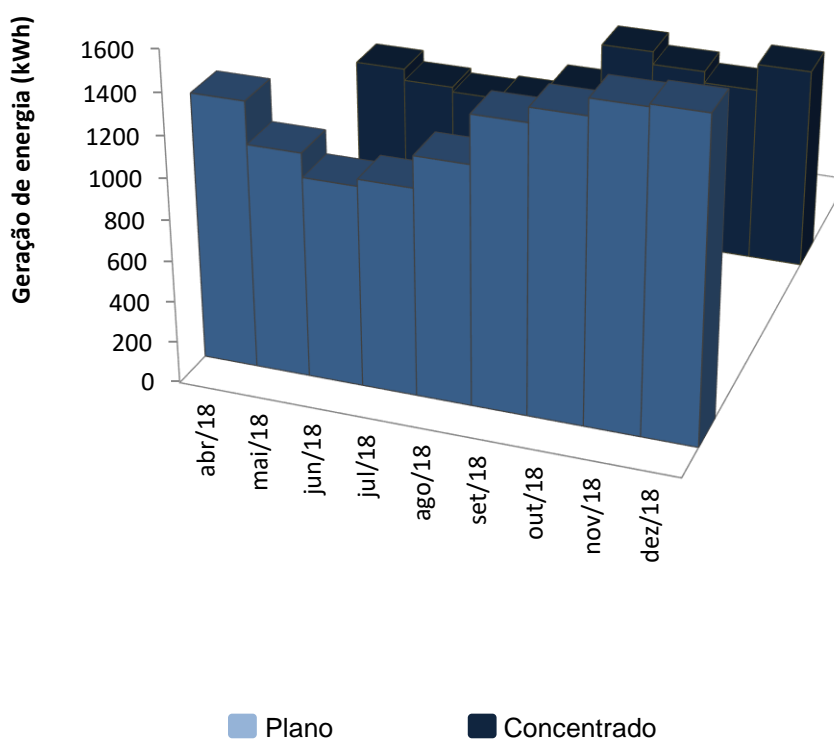
Fonte: Autoria própria, 2019.

A radiação plana horizontal permanece sem grandes alterações no decorrer dos meses, tendo os menores valores entre junho e julho. Estes meses são os mais chuvosos, então o índice de radiação diminui consideravelmente afetando a geração

do sistema, de forma que a geração média anual de um sistema plano é de 1329,6 kWh.

Com relação ao sistema de concentração simulado para região de Paulo Afonso, nota-se que ele possui uma geração abaixo do sistema plano para o mesmo dimensionamento de 10 kWp. Tendo em vista que durante os meses de chuva ele também tem uma queda na geração do seu sistema, que interfere na estabilidade da sua geração, como visto no gráfico 6.

Gráfico 6 – Estimativa de energia gerada em kWh em Paulo Afonso/BA.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Então, no contexto apresentado, o sistema de geração plano tem geração maior que o sistema com concentração, pois o sistema com concentração sofre muita interferência dos fatores climáticos – nebulosidade, vapor d'água, emissão de CO₂ – já que a irradiação direta na cidade de Paulo Afonso não é constante durante o decorrer do ano. Assim, a possibilidade de instalação de um sistema de concentração

pode ser pensada para algumas localidades mediante sua capacidade de geração, sendo que o sistema plano apresenta uma geração de 1,52 vezes maior.

O fator de capacidade leva em consideração a energia total gerada no período de um ano, em que o sistema plano obteve um valor de 18,21%. Enquanto que o sistema com concentração apresentou uma fator de capacidade de 12,94%, sendo assim o sistema plano possui uma capacidade superior na sua geração de energia em torno de 5,27% a mais que o sistema com concentração.

O parâmetro de desempenho para ambos os sistemas manteve-se praticamente com o mesmo rendimento, na faixa de 80%. Onde o sistema plano obteve um rendimento de 82% e o sistema com concentração um rendimento de 80%

Além de que, uma parte da geração do sistema com concentração alimenta o motor, pois como é um sistema de seguimento do tipo pedestal sofre muita influência dos ventos, tendo uma margem de 24 kWh/ano voltada para seu funcionamento.

6.4. Viabilidade econômica

Foi possível constatar que a estimativa de geração do sistema plano tem maior rendimento que o sistema concentrado. No entanto, torna-se necessário ver o investimento nesse tipo de tecnologia com concentração para averiguar se é viável aderir a este novo modelo.

Em relação ao quadro 4, o valor anual da parcela paga para um sistema com concentração óptica é de R\$ 8.432,29 de forma que a tarifa da concessionária para o kWh permaneceu fixa de R\$ 0,79. Nota-se que o valor pago por mês está na faixa entre R\$ 508,82 até R\$ 866,98, de modo que não houve oscilação exagerada entre os valores durante os meses, tendo em média um valor pago de R\$ 702,69.

Quadro 4 – Simulação da viabilidade econômica para o sistema concentrado de 10 kWp.

Análise de Sensibilidade	
Análise de Desempenho - TIR após imposto de capital	
Taxa de flexibilidade anual - 1,6751%	

Preço da energia elétrica demandada		Custo inicial R\$ 69.743,94 VTR: R\$ 0,79/kWh Período: 25 anos. Fator de caixa: R\$ 8.432,29 VPL: R\$ 101.339,23 TIR: 11% Payback: 8 anos e 3 meses <u>Viabilidade positiva</u>
Meses	Valor (R\$)	
abr/18	576,26	
mai/18	528,54	
jun/18	508,82	
jul/18	601,79	
ago/18	793,98	
set/18	742,16	
out/18	696,4	
nov/18	800,11	
dez/18	854,53	
jan/19	866,98	
fev/19	773,69	
mar/19	689,02	

Fonte: Retscreen Expert, 2017.

Em relação ao sistema plano, as mesmas condições do preço do kWh são utilizadas, taxa de juros, período de 25 anos e é possível observar na tabela 6, os valores para cada mês referente a esta tecnologia. Na qual, teríamos que o valor anual de R\$ 12.628,31 e um valor médio por mês de R\$ 1.052,36. Onde o valor da parcela anual para um sistema plano fixo é aproximadamente 1,5 vezes maior que para um sistema com concentração óptica, tendo em vista que sua geração obedece à mesma proporcionalidade.

Quadro 5 – Simulação da viabilidade econômica para o sistema plano de 10 kWp.

Análise de Sensibilidade
Análise de Desempenho - TIR após imposto de capital

Taxa de flexibilidade anual - 1,6751%		<div>Custo inicial</div> <div>R\$ 34.871,97</div> <div>VTR: R\$ 0,79/kWh</div> <div>Período: 25 anos.</div> <div>Fator de caixa: R\$ 12.638,31</div> <div>VPL: R\$ 221.334,47</div> <div>TIR: 34%</div> <div>Payback: 2 anos e 8 meses</div> <div><u>Viabilidade positiva</u></div>
Preço da energia elétrica demandada		
Meses	Valor (R\$)	
abr/18	1200,17	
mai/18	1183,1	
jun/18	1148,98	
jul/18	1023,84	
ago/18	862,68	
set/18	771,67	
out/18	798,22	
nov/18	917,66	
dez/18	1099,68	
jan/19	1178,36	
fev/19	1217,23	
mar/19	1226,71	

Fonte: Retscreen Expert, 2017.

O VPL (Valor Presente Líquido) é o indicador para ter como parâmetro a viabilidade ou não do projeto e o TIR (Taxa Interna de Retorno) usado para tomar como parâmetro se o projeto está tendo retorno positivo ou não. No quadro 6 estarão os dados de comparação entre os dois tipos de sistema.

Com um investimento inicial de R\$ 34.871,97 para um sistema plano fixo e sabendo que o valor do sistema com alta concentração do tipo pedestal é duas vezes maior, temos um investimento de R\$ 69.743,94. Dessa maneira, o sistema com concentração tem de início um investimento alto, mas observando o VPL no período de 25 anos temos que em relação ao plano o retorno é menor, em faixa de R\$ 120.005,20 reais a menos.

Quadro 6 – Comparação entre a viabilidade econômica dos sistemas.

Viabilidade econômica			
Plano		Concentrado	
VPL	TIR	VPL	TIR
R\$ 221.344,43	34%	R\$ 101.339,23	11%

Fonte: Autoria própria, 2019.

No período estipulado, o sistema plano apresenta uma taxa de retorno de 34% do que foi investido e o sistema com concentração uma taxa de 11%, sendo uma diferença de 23% entre o retorno dos investimentos, que é uma diferença considerável na hora de investir. Dessa forma, o sistema com concentração apresenta um retorno menor como é possível observar no VPL.

Levando-se em consideração a parcela anual dos sistemas será possível analisar o payback (recuperação do investimento). No caso, o sistema plano fixo irá quitar seu investimento em dois anos e oito meses, tendo o restante dos anos ganho financeiro. Já o sistema com concentração só irá quitar o investimento a partir de oito anos e três meses. Dessa forma, o sistema plano apresenta uma recuperação mais rápida do investimento ao sistema, mesmo que seu investimento inicial seja menor.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições meteorológicas para o município de Paulo Afonso apresentam bons índices de irradiação global, com uma média de 166,20 kW/m², sendo favorável para a utilização dos sistemas planos. No entanto, os índices de irradiação direta para a localidade estudada foram baixos durante alguns meses, principalmente de abril/2018 até agosto/2018, com uma média de 109,02 kW/m², sendo aproveitada somente cerca de 65% da irradiação direta em relação a global incidente.

A irradiação direta para o município de Paulo Afonso pode ser afetada pela evaporação dos rios de forma a criar uma quantidade de vapor d'água que aliada a pouca nebulosidade e aos meses chuvosos permitam a queda desse tipo de radiação solar.

A estimativa da geração de energia elétrica dos sistemas com concentração e plano fixo para o município de Paulo Afonso – BA se mostrou proporcional aos índices de radiação solar, onde o sistema plano não apresentou grandes variações entre os meses e com uma média de geração de 1326,90 kWh, enquanto que o sistema com concentração obteve números abaixo do apresentado pela estimativa de geração plana, com uma média de 872,18 kWh. A estimativa de geração para localidade de Recife, que apresenta maiores incidências de emissão de gases poluentes e nebulosidade, apresentou uma média de geração de 1009,41 kWh que foi ainda assim superior a do município de Paulo Afonso. O fator de capacidade do sistema plano foi de 18,21%, enquanto que o para o sistema com concentração foi de 12,94%, o seu parâmetro de desempenho foi bem próximo, no caso 82% e 80% respectivamente para o sistema plano e com concentração.

A viabilidade econômica para ambos os sistemas apresentados mostrou que o investimento inicial para um sistema plano é mais acessível, tendo em torno de R\$ 34.871,97 do que para um sistema com concentração que em uma base de mercado se tem um investimento de R\$ 69.743,94. Além de que o retorno da aplicação de capital para o sistema plano é bem mais vantajoso, já que em dois anos e oito meses é possível se quitar o sistema, enquanto que o sistema com concentração leva mais anos. Em que ao final do período, observa-se que o preço do kWh para um sistema

plano saiu bem mais em conta que para um sistema com concentração e com margem significativa para os valores do VPL e TIR.

O sistema com concentração apresenta maior facilidade de instalação por conta da facilidade na conexão das suas partes mecânicas e por isso requer um pequeno espaço na hora da instalação e funcionamento. No entanto, esse sistema sofre com a variação dos níveis de irradiação direta que implica de forma proporcional na sua geração de energia elétrica, de modo que ainda é vantajoso se investir na tecnologia fotovoltaica convencional tanto na parte técnica, quanto visando a economia de investimento.

Portanto, pode ser feito uma análise mais detalhada dos níveis de irradiação direta para o município de Paulo Afonso – BA a fim de verificar os fatores que interferem diretamente nos baixos índices de irradiação solar direta, como forma de difundir a tecnologia em mais localidades com células menores e com maior eficiência para propiciar alternativa e desenvolvimento de um arranjo fotovoltaico mais moderno e eficiente.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica: Benefícios Líquidos ao Brasil.** Brasília, DF. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/16832773/4+-+ABSOLAR+GD+Solar+Fotovoltaica.pdf/f0d41ea4-4bba-8cf8-fb02-sajia>>

ALGORA, C. & STOLLE, I.R. **Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology.** 2016

ALMEIDA, M. P. **Qualificação De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede,** 2012. Universidade de São Paulo. (Dissertação Mestrado).

ALVES, J. **Estudos foto físicos e fotovoltaicos de sistemas polímero-fulereno e nanopartículas de CdSe.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2011. 48 f.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas Energia Solar.** Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. 2017.

BETT, A.; DIMROTH, F.; SIEFER, G. Multijunction Concentrator Solar Cells. **Concentrator Photovoltaics.** p.67–87, 2007. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-68798-6_4. Acessado em: 19/09/2017.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig.** Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, RJ: Especial 2014.

EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro. Maio, 2012

FRAUNHOFER INSTITUTE ISE. **Photovoltaics Report.** , 2014. Freiburg - Alemanha. Disponível em: <<http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>>.

GOMBERT, A.; HEILE, I.; WÜLLNER, J.; GERSTMAIER, T.; VAN RIESEN, S.; GERTER, E.; ROTTGER, M.; LERCHENMULLER, H. .Recent progress in concentrator photovoltaics. ; **Photonics for Solar Energy Systems III**. Anais. p.772508–772508–9, 2010. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=749633>>.

GOUVEIA, H.; FONTENELE, L.; ARAÚJO, R. **Avaliação do Desempenho de um Sistema Fotovoltaico de Alta Concentração no Nordeste Brasileiro**. Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica – ANEEL. 2015

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007. 146 f.

KURTZ, S. **Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry.** . Technical Report. NREL - National Renewable Energy Laboratory. November, 2012.

LUQUE, A.; ANDREEV, V. **Concentrator Photovoltaics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

LUQUE, A. & HEGEDUS, S **Handbook of photovoltaicscience and engineering, Chichester: John Wiley & Sons**, 2011.

MACHADO, C.; MIRANDA, F. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma breve revisão**. Revista virtual de química. Niterói, RJ, vol. 7, n. 1, p. 126-143, 14, out. 2014.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Energia Solar no Brasil e Mundo**. Edição Out/ 2017.

OLIVEIRA, S. H. F. DE. **Geração Distribuída De Eletricidade; Inserção De Edificações Fotovoltaicas Conectadas À Rede No Estado De São Paulo**, 2002. Universidade De São Paulo – Usp Instituto De Eletrotécnica E Energia.

PÉREZ-HIGUERAS, P.; MUÑOZ, E.; ALMONACID, G.; VIDAL, P. G. High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1810–1815, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004156>>. Acesso em: 13/09/2017.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

RUTHER, R. – **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligadas a rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis, SC: Labsolar, 2004.

SAYEGH, M.A; DANIELEWICZ, J. MINIEWICZ. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 68, Parte 2. Fevereiro, 2017.

URIBE, FRANCISCO, JOSÉ B. **Análise operacional de um sistema fotovoltaico com alta concentração de 10 kWp interligado à rede**. Recife-PE, 2015. Dissertação (Pós-graduação em Tecnologias Energéticas Nucleares) - Curso de Pós Graduação, Universidade Federal de Pernambuco - Campus Recife, Universidade Estadual Paulista, 2015.

APÊNDICE

Figura 22 – Sistema com concentração localizado na UFPE – Campus Recife



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 23 – Sistema de proteção do sistema com concentração da UFPE



Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 24 – Partes mecânicas do sistema com concentração

Fonte: Autoria própria, 2019