



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JONAS PINHEIRO DA SILVA

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE PLANTAS FV COM MÓDULOS
FIXOS E COM SEGUIMENTO SOLAR: ESTUDO DE CASO PARA JUAZEIRO
DO NORTE – CE.**

FORTALEZA

2019

JONAS PINHEIRO DA SILVA

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE PLANTAS FV COM MÓDULOS
FIXOS E COM SEGUIMENTO SOLAR: ESTUDO DE CASO PARA JUAZEIRO
DO NORTE – CE.**

Monografia apresentada ao programa de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de
concentração: Sistemas de Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques
de Carvalho.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S58c

Silva, Jonas Pinheiro da.

Comparação de desempenho de plantas FV com módulos fixos e com seguimento solar : Estudo de caso para Juazeiro do Norte - CE. / Jonas Pinheiro da Silva. – 2019.

89 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

1. Seguidor Solar. 2. Desempenho de Sistema Fotovoltaico. 3. Comparação de Sistemas Fotovoltaicos. I. Título.

CDD 621.3

JONAS PINHEIRO DA SILVA

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE PLANTAS FV COM MÓDULOS
FIXOS E COM SEGUIMENTO SOLAR: ESTUDO DE CASO PARA JUAZEIRO
DO NORTE – CE.**

Monografia apresentada ao programa de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de
concentração: Sistemas de Energia

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Roberto Maciel Campos
Autoterm Energias

A Deus,
a minha mãe, Aldemira,
a meu pai, Josias,
aos meus irmãos, Antônio e Heitor,
eu dedico esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Maria Aldemira, e meu pai, Francisco Josias, por todo amor, carinho, educação e suporte prestados. Pela ética, respeito e dignidade que me mostraram e ensinaram. Nada seria possível sem vocês.

Aos meus irmãos, Antônio Rodrigues e Heitor Pinheiro, por toda a parceria, atenção e disposição em me auxiliar nos mais diversos aspectos, além dos inúmeros momentos de descontração.

A minha namorada, Dara Lima, pelo amor, carinho, paciência, compreensão e acolhimento, por estar ao meu lado, suportando estresses e auxiliando a superar problemas.

Aos meus amigos Edivam, Machado, Murilo, Stênio e Tito pelas experiências trocadas, pelas ajudas prestadas nos mais diversos aspectos, e pelas conquistas e superações alcançadas desde o início de nossa graduação.

Ao meu orientador Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho, pela orientação e toda atenção dada a este trabalho.

Ao meu supervisor de estágio, e participante da banca examinadora, o engenheiro Roberto Maciel Campos, pela incrível oportunidade de trabalhar com engenharia aplicada, pelos inúmeros conselhos e ensinamentos, e por fim, pela confiança em minhas capacidades.

Ao professor M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco, pelos conhecimentos, atenção e profissionalismo. Também o agradeço por aceitar o convite de participar desta banca avaliadora.

Aos colegas e amigos da universidade, pelas contribuições técnicas, pelos os momentos de diversão e por toda prestatividade.

Ao meu colega de estágio Izael, pelo profissionalismo e dicas que me ofereceu.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC que tanto me instigaram a buscar novos conhecimentos.

E finalmente, a toda a minha família, por todo o apoio e incentivo a me tornar um profissional e pessoa melhor.

“Quem nunca cometeu um erro nunca
tentou algo novo.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo sobre duas plantas de geração fotovoltaica (FV), localizadas na zona urbana da cidade de Juazeiro do Norte – Ceará, ambas conectadas à rede elétrica do Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, campus Lagoa Seca. As duas plantas FV, a primeira com ângulo de inclinação fixo e a segunda com Geradores Solares Heliotrópicos, equipamentos comerciais com capacidade de rastrear os movimentos aparentes do sol no céu com dois eixos, são descritos ao longo deste trabalho. A segunda planta com rastreamento tem um capítulo especial que trata de todas as atividades desenvolvidas para sua implantação, indicando procedimentos, dificuldades, peculiaridades e soluções de problemáticas relacionadas à sua instalação. Foram calculados a produtividade e o Fator de capacidade (FC) das duas as plantas com o intuito de realizar uma comparação direta entre os dois tipos de instalação dos módulos FV. O ganho médio de produtividade obtido pelo sistema com rastreador solar, em relação ao sistema fixo, para o período dos 4 primeiros meses de 2019 foi de 36,05%, sendo que no mês de fevereiro o ganho foi de 43,68% e no mês de março o ganho foi de 24,19%, maior e menor ganho, respectivamente, dentre os meses analisados. O FC médio da planta com rastreador solar foi de 23,04%, tendo como valor máximo 26,42% no mês de fevereiro e valor mínimo de 20,58% no mês de março. Já o FC médio da planta fixa foi de 16,92%, com valores máximo e mínimo de 18,39% em fevereiro e 15,60% em abril, respectivamente.

Palavras-chave: Seguidor Solar. Desempenho de Sistema Fotovoltaico. Comparação de Sistemas Fotovoltaicos.

ABSTRACT

The present work proposes a study on two photovoltaic (PV) generation plants, located in the urban area of Juazeiro do Norte - Ceará, both connected to the Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, Lagoa Seca campus. The first plant has a fixed angle of inclination and the second has Geradores Solares Heliotrópicos, equipment with the ability to track the movements of the sun and the solar rays, are sent throughout this work. The second plant with tracking has a special chapter that deals with all the activities related to its implementation, which deal with difficulties, peculiarities and solutions of problems related to its installation. The productivity and capacity factor (CF) of the two plants were calculated in order to test the environment between the two types of installation of the PV modules. The average profit of the system with solar tracker for the first four months of 2019 was 36.05%, and in February the gain was 43.68% and in March the gain was 24.19%, higher and lower gain, respectively, among the months. The mean FC of the solar tracker plant was 23.04%, with a maximum value of 26.42% in the month of February and a minimum value of 20.58% in the month of March. The average FC of the fixed plant was 16.92%, with a minimum value of 18.39% in February and 15.60% in April, respectively.

Keywords: Solar tracking. Photovoltaic system performance. Comparison of Photovoltaic Systems.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Matriz elétrica brasileira. | 2 |
| Figura 2 – Seguidor solar com módulos instalados. | 6 |
| Figura 3 - Estrutura do módulo fixo no campus Farroupilha do IFRS. | 7 |
| Figura 4 - Estrutura do seguidor solar no campus Farroupilha do IFRS. | 7 |
| Figura 5 - Estrutura do protótipo de seguidor solar. | 8 |
| Figura 6 - Estrutura do seguidor solar em Jaguari – RS. | 10 |
| Figura 7 - Irradiância normal ao plano dos módulos FV com rastreamento e com ângulo fixo em dia com céu predominantemente limpo. | 10 |
| Figura 8 - Irradiância normal ao plano dos módulos FV com rastreamento e com ângulo fixo em dia com muitas nuvens. | 11 |
| Figura 9– Módulo FV Fixo. | 14 |
| Figura 10 - Módulo FV em seguidor solar. | 14 |
| Figura 11 – Imagem de satélite de Juazeiro do Norte com a localização do Instituto Leão Sampaio. | 19 |
| Figura 12 – Imagem de satélite da área pertencente ao instituto de ensino. | 19 |
| Figura 13 - Inversor solar Ingecon Sun 3Play 20TL M P. | 22 |
| Figura 14 – Diagrama do circuito elétrico Ingecon Sun 3Play 20TL M P. | 24 |
| Figura 15 - Inversor solar SG60KTL. | 26 |
| Figura 16 - Diagrama do circuito elétrico SG60KTL. | 28 |
| Figura 17 - Movimento anual aparente do Sol na direção norte-sul, associado à variação da sua declinação. | 29 |
| Figura 18 - Dados gerais da planta. | 32 |
| Figura 19 - Dados de Localização da planta e níveis de albedo. | 33 |
| Figura 20 - Aba “Exposições”. | 34 |
| Figura 21 - Aba “Componentes”. | 35 |
| Figura 22 - Aba “Exposições” – Rastreador solar. | 38 |
| Figura 23 - Aba “Componentes” – Rastreador solar. | 38 |
| Figura 24 – Oficina. | 41 |
| Figura 25 – Base de concreto do gerador. | 42 |
| Figura 26 - Detalhe da parte mais inferior do tronco do gerador. | 43 |
| Figura 27 - Troncos instalados formando uma fila. | 43 |
| Figura 28 - Helicóptero. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 - Grades empilhadas logo após fabricação..... | 44 |
| Figura 30 - Grade após pintura. | 45 |
| Figura 31 - Esquema da disposição dos módulos FV..... | 45 |
| Figura 32 - Detalhe da face superior da base de concreto. | 46 |
| Figura 33 - Caminhão “munck” suspendendo o tronco de um gerador..... | 46 |
| Figura 34 - Detalhe do eletroduto instalado na base de concreto..... | 47 |
| Figura 35 - Escavações para instalações elétricas. | 48 |
| Figura 36 - Detalhe de escavação para caixa de passagem. | 48 |
| Figura 37 - Caixa de passagem em alvenaria. | 49 |
| Figura 38 - Construção do abrigo. | 49 |
| Figura 39 - Instalação de eletrodutos..... | 50 |
| Figura 40 - Cabos na base do gerador. | 50 |
| Figura 41 - Fixação de módulos FV em grade. | 51 |
| Figura 42 - Inversor solar instalado em parede do abrigo. | 51 |
| Figura 43 - Quadro geral de baixa tensão..... | 52 |
| Figura 44 - Módulos FV fixados na grade..... | 52 |
| Figura 45 - Medição da tensão de <i>string</i> utilizando multímetro..... | 54 |
| Figura 46 - Quadro elétrico de comando. | 54 |
| Figura 47 - Teste de Gerador Heliotrópico..... | 55 |
| Figura 48 - Tensão de linha na saída do inversor solar. | 56 |
| Figura 49 - Tensão de fase na saída do inversor solar..... | 57 |
| Figura 50 - Teste de iluminação indireta dos geradores..... | 57 |
| Figura 51 - Teste de iluminação decorativa dos geradores. | 58 |
| Figura 52 - Teste de iluminação dos geradores. | 58 |
| Figura 53 - Detalhe de iluminação de um gerador individual. | 59 |
| Figura 54 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 1 | 62 |
| Figura 55 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 2 | 62 |
| Figura 56 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 3 | 62 |
| Figura 57 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 4 | 63 |
| Figura 58 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 5 | 63 |
| Figura 59 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 6 | 63 |
| Figura 60 - Esquema de módulos e <i>strings</i> no Gerador Heliotrópico 7 | 64 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Revisão dos estudos feitos sobre seguidor solar no Brasil..... | 16 |
| Tabela 2 - Revisão dos estudos feitos sobre seguidor solar no Exterior. | 17 |
| Tabela 3 - Dados do módulo FV utilizado na planta fixa..... | 21 |
| Tabela 4 - Dados do inversor solar Ingecon Sun 3Play 20TL M P..... | 23 |
| Tabela 5 - Dados do módulo FV utilizado no Gerador Solar Heliotrópico..... | 25 |
| Tabela 6 - Dados do inversor solar SG60KTL. | 27 |
| Tabela 7 - Dados de simulação de produção de energia elétrica diárias e mensais da planta fixa. | 36 |
| Tabela 8 - Resumo das informações mais importantes da simulação. | 37 |
| Tabela 9 - Dados de simulação de produções de energia elétrica diárias e mensais de Rastreador Solar. | 39 |
| Tabela 10 - Resumo das informações mais importantes da simulação. | 40 |
| Tabela 11 - Geração de energia elétrica mensal em kWh (2019)..... | 66 |
| Tabela 12 - Produtividade mensal em kWh/kWp (2019)..... | 67 |
| Tabela 13 - Fator de capacidade mensal das plantas (2019). | 68 |
| Tabela 14 - Geração de energia elétrica mensal em kWh para planta de 208,08 kWp com ângulo fixo (2019). | 70 |
| Tabela 15 - Geração de energia elétrica mensal em kWh para planta de seguidor solar (2019). | 71 |
| Tabela 16 - Chuvas em Juazeiro do Norte no período analisado. | 72 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Cenário Mundial..... | 1 |
| 1.2 Cenário Brasileiro | 1 |
| 1.3 Cenário Regional..... | 2 |
| 1.4 Contextualização e motivação..... | 3 |
| 1.5 Trabalho Proposto | 3 |
| 1.6 Estrutura do Trabalho..... | 4 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 5 |
| 2.1 Experiências no Brasil com seguidores solares..... | 5 |
| 2.2 Experiências no Mundo com seguidores solares..... | 12 |
| 3. DESCRIÇÃO DAS PLANTAS | 18 |
| 3.1 Planta Fixa:..... | 20 |
| 3.1.1 Módulo FV | 20 |
| 3.1.2 Inversor Solar: | 21 |
| 3.2 Planta de Geradores Heliotrópicos:..... | 24 |
| 3.2.1 Módulo FV..... | 24 |
| 3.2.2 Inversor solar..... | 26 |
| 3.2.3 Gerador Solar Heliotrópico..... | 28 |
| 3.2.3.1 Movimento Leste-Oeste:..... | 28 |
| 3.2.3.1 Movimento Norte-Sul: | 29 |
| 4. SIMULAÇÕES DAS PLANTAS | 31 |
| 4.1 Simulação da Planta Fixa: | 31 |
| 4.1.1 Procedimento da simulação da planta fixa: | 32 |
| 4.2 Simulação da planta de seguidor solar: | 37 |
| 4.2.1 Procedimento da simulação da planta de seguidor solar: | 37 |
| 5. INSTALAÇÃO DA PLANTA FV COM SEGUIDORES..... | 41 |
| 5.1 Aspectos construtivos..... | 41 |
| 5.1.1 Base de concreto..... | 41 |
| 5.1.2 Tronco | 42 |
| 5.1.3 Helicóptero | 43 |
| 5.1.4 Grade..... | 44 |
| 5.2 Procedimento de instalações | 45 |
| 5.3 Problemática dos cabos elétricos..... | 59 |
| 5.3.1 Condutores CC..... | 60 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.3.2 | Condutores CA..... | 64 |
| 6. | COLETA DE DADOS E DISCUSSÕES..... | 66 |
| 6.1 | Dados coletados..... | 66 |
| 6.2 | Produtividade | 67 |
| 6.3 | Fator de Capacidade..... | 68 |
| 6.4 | Plantas reais X simulações | 69 |
| 6.4.1 | Planta Fixa..... | 69 |
| 6.4.2 | Geradores Heliotrópicos..... | 70 |
| 7. | CONCLUSÕES | 73 |
| 8. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 74 |
| | REFERÊNCIAS | 75 |

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, uma questão bem recorrente é a demanda por energias provenientes de fontes alternativas para integração da matriz energética mundial. A ideia por trás disso é a busca pela redução da dependência de combustíveis fósseis e a minimização dos impactos ambientais ocasionadas por fontes poluentes. Dentre estas fontes alternativas, cita-se aqui a geração de energia elétrica à partir da tecnologia fotovoltaica, que possui baixo impacto ambiental, ausência de emissão de gases poluentes e implantação rápida.

1.1 Cenário Mundial

A potência instalada de instalações FV nos 10 maiores mercados deste ramo no mundo já superou os 430 GW, sendo que uma fatia de 40,59% desta potência está toda localizada na China, país com a maior potência instalada no mundo e que mais investiu com energia solar FV em 2018 com 45 GW instalados neste ano, tem grande folga em relação aos Estados Unidos, que vem em seguida no ranking de potência instalada (IEA PVPS, 2019).

Para se ter uma noção do quanto a China investe em plantas FV, esta potência de 45 GW instalados em 2018 é maior do que o somatório das potências instaladas no mesmo ano dos 9 seguintes maiores países investidores: Índia (10,8 GW), Estados Unidos (10,6 GW), Japão (6,5 GW), Austrália (3,8 GW), Alemanha (3,0 GW), México (2,7 GW), Coreia do Sul (2,0 GW), Turquia (1,6 GW) e Holanda (1,3 GW).

1.2 Cenário Brasileiro

Apesar do gigantesco potencial que possui, o Brasil possui uma potência total instalada modesta de 2.819,5 MW, sendo 2.084,0 MW na modalidade de geração centralizada, que representa 1,2% da matriz elétrica brasileira, estando empatada numericamente com a fatia relativa às plantas nucleares.

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira.



Fonte: Infográfico Absolar, 2019.

Em fevereiro de 2019, 0,6% da oferta de energia elétrica no Brasil foi gerada pela fonte solar FV, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME). É de extrema importância que este número cresça nos próximos anos, dentre as vantagens trazidas com este crescimento podemos ter a redução de gastos com energia elétrica para a população, empresas e governos, trazendo economia para a sociedade como um todo, diminuição de recursos hídricos escassos, pois os sistemas FV não precisa de água para operar, e ainda reduz perdas com transmissão e distribuição da energia elétrica gerada.

Minas Gerais (20,5%), Rio Grande do Sul (16,0%) e São Paulo (12,1%) são os três estados brasileiros com as maiores potências instaladas no país, juntos concentram quase metade de toda a potência do país (ANEEL/ABSOLAR, 2019).

1.3 Cenário Regional

A região Nordeste tem 115,4 MW de potência instaladas de sistemas FV, perdendo para as regiões Sudeste (286,6 MW) e Sul (212,7 MW). O estado do Ceará é o oitavo do Brasil, com 28,3 MW instalados, 3,8% de toda potência instalada no Brasil (ANEEL/ABSOLAR, 2019).

Segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), a região nordeste bateu novos recordes de geração de energia elétrica a partir da fonte solar FV: máxima diária em 09/03/2019, com fator de capacidade instantâneo de 92%.

No ranking das cidades, Uberlândia – MG, Brasília – DF e Rio de Janeiro – RJ tem as maiores potências instaladas no país, com 12,5, 11,8 e 11,6 MW, respectivamente. Fortaleza, capital do Ceará, é a primeira cidade da região Nordeste e 4º do país.

1.4 Contextualização e motivação

A oportunidade que os consumidores tem de gerar a energia elétrica consumida por eles de maneira relativamente simples, podendo pagar menos nas faturas de energia elétrica de suas casas, estabelecimentos comerciais, indústrias, fazendas e sítios, faz com que os sistemas FV sejam amplamente difundidos. Esta difusão traz vantagens para a sociedade.

Considerando a questão da empregabilidade, há a criação de inúmeras vagas de trabalhadores para os diferentes ramos que envolvem a tecnologia FV, que vai desde a importação ou fabricação de equipamentos até a instalação e sistemas de monitoramento das plantas em funcionamento. No lado técnico, existem vantagens para a concessionária de energia elétrica, que podem postergar reforços e melhoria de infraestrutura da sua rede em localidades em que existem plantas FV, além de diminuição de perdas na distribuição da energia elétrica. E por fim, olhando para a questão ambiental, plantas FV não produzem ruídos, não emitem gases poluentes, e podem substituir instalações utilizadas para geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis.

Com o propósito de apresentar as experiências de se trabalhar com uma planta FV com seguidor solar, este trabalho de conclusão de curso visa dar um detalhamento de métodos, procedimentos adotados e soluções para dificuldades encontradas ao longo das atividades. Também são realizadas análises de desempenho das duas plantas FV presentes em uma instituição de ensino superior na cidade de Juazeiro do Norte, no sul do Ceará.

1.5 Trabalho Proposto

Este trabalho propõe apresentar os dois tipos de plantas FV instalados no Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário campus Lagoa Seca, em Juazeiro do Norte-CE. Composto por uma planta fixa com potência nominal de 208,08 kWp e uma planta com seguimento solar de 540,54 kWp (este último ainda em processo de construção).

Há ainda uma descrição de como se deu o processo de instalação de 60,06 kWp desse montante de 540,54 kWp com seguimento solar, iniciando pelas bases de concreto que sustentam a estrutura utilizada para montagem do seguidor, passando pelas instalações elétricas e concluindo com explicações sobre a bateria de testes.

Por fim, também é mostrado neste trabalho um estudo de desempenho das plantas fixa e seguidor solar que compara as duas plantas entre si, e uma outra comparação destas plantas com suas simulações em um *software* comercial, o Solergo.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em um total de oito capítulos, sendo o presente capítulo o primeiro, de introdução. Os próximos capítulos estão descritos na sequência:

Capítulo 2 – Estado da Arte. São mostrados artigos desenvolvidos no Brasil e no mundo que tratam de plantas de rastreamento solar.

Capítulo 3 – Descrição das Plantas. Este capítulo é o responsável por descrever as duas plantas que são estudadas ao longo de todo este trabalho.

Capítulo 4 - Simulações das Plantas. Neste capítulo as duas plantas estudadas são simuladas em um software comercial feito para levantamentos de plantas FV em todo o mundo, auxiliando projetistas e interessados no assunto.

Capítulo 5 – Instalações. Todas características das instalações civis, mecânicas e elétricas da planta de seguidor solar são mostradas neste capítulo, dando a oportunidade de o leitor conseguir uma certa visualização do que se passou durante os procedimentos.

Capítulo 6 – Coleta de Dados e Discussões. As análises de desempenho das plantas, bem como as comparações entre ambas as plantas são desenvolvidas neste capítulo.

Capítulo 7 – Conclusões. São apresentadas as considerações finais do trabalho, fazendo uma análise geral do estudo realizado.

Capítulo 8 – Sugestões para trabalhos futuros. O capítulo final lista diversas sugestões para estudos posteriores, baseadas em novos aspectos que podem ser explorados a respeito dos temas aqui tratados.

2. ESTADO DA ARTE

Em sistemas de geração distribuída, um dos modos mais comuns de se fazer a instalação de plantas FV é aquele que se aproveita de construções já existentes, aproveitando telhados de casas, prédios e galpões industriais. Uma observação que pode ser feita a respeito disso é que em alguns casos a planta pode acabar não funcionando da melhor maneira, isto é, pode deixar de produzir uma quantidade considerável de energia elétrica. Isto ocorre por conta das disposições dos telhados que podem vir a ter orientação e inclinação distantes daquelas que seriam a situação de melhor aproveitamento dos raios solares.

Um método de evitar esse não aproveitamento de todo o potencial de uma planta FV é utilizar um seguidor solar. Um seguidor solar ou seguidor solar é um dispositivo que altera várias vezes a posição dos FV durante o dia, seguindo o caminho do sol para aumentar a geração de eletricidade da planta FV (Portal Solar, 2016).

Um equipamento que tem a capacidade de acompanhar os movimentos aparentes do sol pode possuir um ou dois eixos de seguimento, diferentes tamanhos, alta ou baixa complexidade, métodos de acionamento e controle diversos, e claro, diferentes níveis de aproveitamento solar.

Assim, se faz necessário um estudo o efeito de um seguidor solar em plantas FV. Diversos estudos foram realizados sobre estes equipamentos e neste capítulo são apresentados alguns deles em publicações no Brasil e no mundo.

2.1 Experiências no Brasil com seguidores solares.

Visando, entre outros objetivos, registrar o ganho percentual de eletricidade gerada por uma planta fotovoltaica (FV) com seguimento solar frente à um planta fixa e analisar o aspecto econômico da implementação de uma planta como esta, Oliveira (2008) indica que justifica-se um estudo para verificar o acréscimo de produção energética de uma planta com seguidor em relação a um fixo. Neste mesmo trabalho, Oliveira nos mostra que os maiores ganhos energéticos anuais de superfícies com seguimento solar, em relação a superfícies estáticas e com inclinação igual à latitude local para as cidades de Aracaju, São Paulo, Macapá, Manaus e Recife estão entre 7 e 11%. Por se tratar de uma planta utilizada em um trabalho acadêmico, a potência de instalação é bem pequena: 170 Wp tanto na planta fixa quanto na planta de seguimento. A estrutura do seguidor solar do trabalho de Oliveira é mostrada na figura 2.

Figura 2 – Seguidor solar com módulos instalados.



Fonte: Oliveira (2008, p.58)

- **Análise comparativa entre sistema fixo e seguidor solar de dois eixos em Farroupilha - RS (FROSI et al., 2018)**

Durante o período analisado, compreendido entre os dias 19 de setembro de 2017 a 9 de outubro de 2017, FROSI et al. (2018) informam que o módulo rastreador solar obteve um ganho de 25,4% em relação à planta fixa, tendo como ganho máximo, em um dos dias de análise, 36% a mais de energia elétrica produzida do que a planta fixa. Os módulos FV utilizados neste trabalho são de 250 Wp.

A planta com seguimento solar é constituída de apenas um módulo que é movimentado para a posição desejada com o auxílio de duas barras roscadas zincadas de 14mm que estão acopladas a motores CC. A planta fixa é composta por dois módulos em um ângulo de 29°, instalado próximo ao chão, porém, a fim de fazer a comparação direta com o seguidor solar, apenas um módulo foi observado. Ambas as plantas estão instaladas no campus Farroupilha do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS). A figura 3 mostra a planta fixa instalada.

Figura 3 - Estrutura do módulo fixo no campus Farroupilha do IFRS.



Fonte: FROSI et al., 2018

A figura 4 apresenta o seguidor solar instalado no campus Farroupilha do IFRS.

Figura 4 - Estrutura do seguidor solar no campus Farroupilha do IFRS.



Fonte: FROSI et al., 2018.

Outras observações interessantes oriundas deste trabalho que podem ser listadas são:

- a) observa-se que o seguidor solar apresenta comportamento distinto em dias com diferentes condições climáticas, sendo que o melhor aproveitamento da planta ocorre em dias com máxima radiação e sem incidência de nuvens;
- b) a maior diferença de irradiação incidente sobre as duas plantas ocorre no início e ao final do dia, quando o seguidor solar consegue compensar a perda de absorção que acontece na planta com módulos fixos devido a mudança na angulação;

- c) quando o seguidor e o módulo fixo têm aproximadamente a mesma angulação (próximo ao meio dia) os valores de irradiância se aproximam;
- d) em dias nebulosos o seguidor solar encontra dificuldades em corrigir sua posição, fazendo com que a eletricidade produzida seja significativamente menor.

- **Desenvolvimento de sistema automático de rastreamento solar (ORTIZ et al., 2018)**

Alguns estudos importantes têm como objetivo desenvolver métodos de rastreamento solar automáticos. Por exemplo, ORTIZ et al. (2018), realizaram um estudo de desenvolvimento de um sistema automático de rastreamento solar utilizando células FV, resistores dependentes de luz ou LDR's, motores de passo e um Arduino. Em dois dias de observação o uso do rastreador solar no painel FV aumentou sua geração em 27,2% no primeiro dia e 24,97% no segundo dia. Na figura 5 é possível ver a estrutura do seguidor do estudo realizado no artigo.

Figura 5 - Estrutura do protótipo de seguidor solar.



Fonte: ORTIZ et al., 2018

- **Avaliação de desempenho de um seguidor solar monoaxial para sistemas FV (BARBOSA et al., 2016)**

Em um estudo realizado no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC) na cidade de Fortaleza - CE, BARBOSA et al. (2016) utilizaram uma planta de módulos FV instalados em uma estrutura que permite o seguimento solar em um eixo, um piranômetro, um CLP e lâmpadas halógenas de 55W para simular cargas diretamente acopladas à planta, com o intuito de verificar os ganhos de produção de energia em cima da produção de uma planta semelhante, sendo esta uma planta fixa.

Após as simulações da planta com intervalos de posicionamento de 15, 30 e 60 minutos, com malha aberta e com malha fechada, viu-se que os maiores ganhos foram de 20,72% para a planta em malha aberta e 27,42% para a planta em malha fechada. Tais ganhos foram encontrados ainda com as simulações que realizaram a atualização do posicionamento angular a cada 60 minutos.

- **Otimização de produção e eficiência de usinas fotovoltaicas com o uso de rastreadores solares (LIMA; SARRADE, 2016)**

Em seus estudos de uma planta FV de 300 kWp localizada no estado de Pernambuco, composta por uma instalação de ângulo fixo e por rastreadores Exotrack®Hz, rastreadores solares de um eixo comerciais, fabricados pela ArcelorMittal (LIMA; SARRADE, 2018) apresentam como uma das vantagens do seguimento solar o aumento do período de geração e a manutenção de uma curva mais constante ao longo do dia. A geração se mantém constante no seu valor máximo durante 80% do dia, diferentemente da curva clássica de plantas com ângulo fixo, que possui o seu pico próximo ao meio-dia.

Neste estudo, viu-se que a planta de seguidor solar tem a capacidade de produzir até 29,5% de energia a mais em comparação à planta fixa, anualmente. O pico do valor de ganho aconteceu no mês de novembro, quando se atingiu um aumento da produção energética de 35,5% devido à tecnologia de rastreamento.

- **Sistema de rastreamento de dois eixos no município de Jaguari – RS (NASCIMENTO et al., 2018)**

Neste estudo o gerador solar munido de rastreamento de dois eixos possui 11,76 kWp de potência instalada com módulos de tecnologia de silício policristalino. O eixo

de abertura azimutal possui abertura de 240° (-120° a 120°) e a elevação zenital varia entre 0° e 58° . A figura 6 mostra a estrutura utilizada.

Figura 6 - Estrutura do seguidor solar em Jaguari – RS.

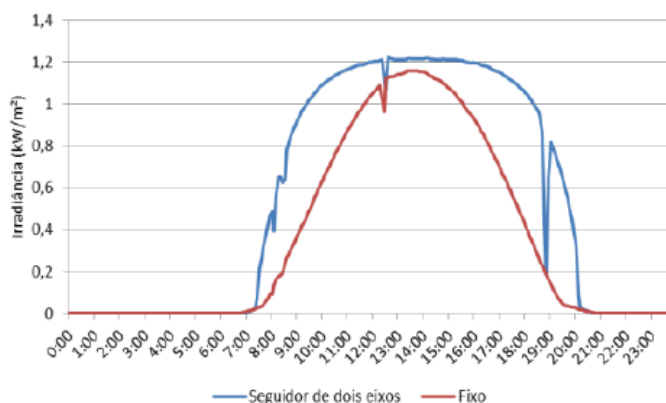


Fonte: NASCIMENTO et al., 2018

A comparação de desempenho entre as plantas de seguidor solar e ângulo fixo foi realizada comparando os dados medidos pela célula de referência acoplada ao rastreador e pela célula de referência fixa inclinada a 29° acoplada a uma estação solarimétrica instalada no local.

A figura 7 mostra os gráficos dos valores de irradiância global normal ao plano dos módulos FV com rastreamento e os valores de irradiação global inclinada no plano da célula com ângulo fixo, medidos durante o dia 29 de janeiro de 2016, dia caracterizado como um dia com céu predominantemente limpo.

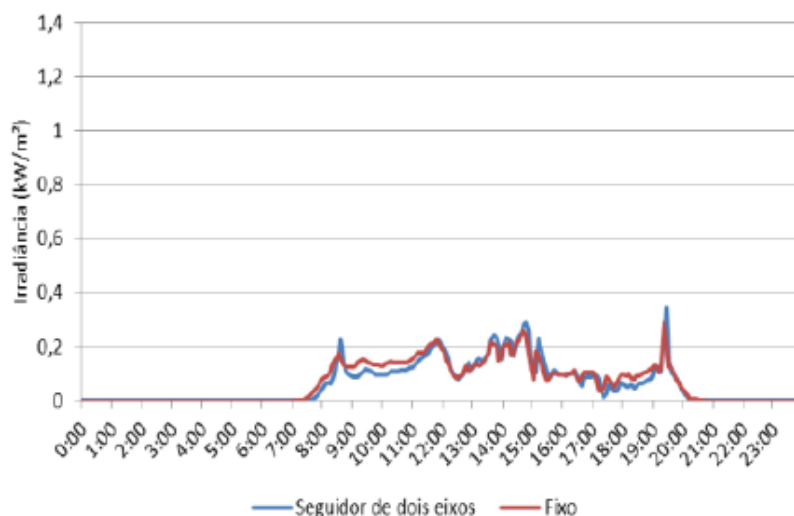
Figura 7 - Irradiância normal ao plano dos módulos FV com rastreamento e com ângulo fixo em dia com céu predominantemente limpo.



Fonte: NASCIMENTO et al., 2018

Visualizando a figura 6 vê-se que os ganhos mais significativos da planta rastreadora acontecem nas primeiras e últimas horas de geração diárias, bem como havia sido relatado no trabalho de FROSI et al., 2018. Em um dia de muitas nuvens, as duas plantas não diferem significativamente na absorção de irradiância. Segundo os autores, isto ocorre por conta de a parcela de irradiação direta ser baixa e a irradiação difusa ser predominante. A figura 8 ilustra essa observação:

Figura 8 - Irradiância normal ao plano dos módulos FV com rastreamento e com ângulo fixo em dia com muitas nuvens.



Fonte: NASCIMENTO et al., 2018

Os autores compararam a irradiação global normal, quando comparada a irradiação no plano inclinado, com inclinação do sensor solarimétrico igual à latitude local (esta é definida como a inclinação que oferece o melhor aproveitamento para uma planta sem rastreamento) durante o período de 15/01/2016 a 31/07/2016 e observaram que, em média, a irradiação global normal é 30% maior na planta rastreador de dois eixos do que na planta de ângulo fixo.

A produtividade, medida em kWh/kWp, observada no período completo (outubro de 2014 a julho de 2016) de análise da planta foi de 1715 kWh/kWp. O fator de capacidade da planta foi de 19,8%. Os autores ressaltam ainda o consumo médio anual dos motores utilizados para realizar o rastreamento: 100 kWh.

2.2 Experiências no Mundo com seguidores solares.

- **Produção de energia de sistemas FV: fixo, seguidor e concentrador (GIL; WANG; BARNETT, 2011)**

Tal trabalho traz um estudo aprofundado sobre a energia produzida por plantas FV de diferentes configurações: plantas fixas, plantas de seguimento solar de 1 e 2 eixos, e plantas concentradoras instaladas próximos a cidade de Sevilla, no sul da Espanha.

Entre as medidas que refletem a performance de uma planta FV que fora objeto de estudo dos autores, destaco aqui a produção de energia. A energia produzida em termos kWh/kWp indica a capacidade da planta FV de gerar energia e pode ser afetada pela capacidade de coletar irradiação solar e pela capacidade de conversão desta irradiação em energia elétrica.

Os autores observaram a produção de energia das plantas estudadas em simulações e a produção de energia real das instalações. Nas simulações das plantas estudadas pelos autores, foi utilizado como banco de dados de irradiação solar e dados climatológicos da Europa o PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*). Com o PVGIS é possível calcular uma produção energética teórica para diferentes configurações de plantas FV.

Enquanto as simulações feitas com o auxílio do PVGIS indicam ganhos de produção de energia (kWh/kWp) de 32,1% para o seguidor de 1 eixo e 38,7% para o seguidor de 2 eixos, os ganhos reais mostrados pelas plantas em 2009 foram de 22,3% e 25,2% para as plantas de 1 eixo e 2 eixos, respectivamente. Todos estes números de ganhos são em relação à produção de energia da planta fixa.

Já para a planta de concentradores, as simulações indicam ganhos de 16,1% em relação a energia produzida por uma planta convencional fixa. Com os dados de geração reais de 2009, viu-se que este ganho foi de apenas 0,6%.

- **Comparação de desempenhos entre um rastreador solar de dois eixos e um sistema fotovoltaico fixo (EKE; SENTURK, 2012)**

Em outubro de 2009, duas plantas FV com seguidores solar de dois eixos idênticos foram instaladas na universidade de Mugla, na Turquia. Estas duas plantas de 7,9 kWp possuíam o mesmo módulo FV e inversores. Após um ano de operação os autores realizaram uma análise de desempenho destas plantas.

As primeiras medições se deram com os sistemas funcionando em um ângulo fixo, em seguida, as plantas passaram a funcionar no modo de seguimento. Com as plantas funcionando em ângulo fixo, a produtividade da mesma foi de 1459 kWh/kWp. No modo de seguimento solar, as plantas foram capazes de superar a produtividade, em relação ao sistema fixo, em pouco mais de 30%. Além desta comparação de desempenho entre os métodos de instalação dos módulos FV, também foi analisada a geração real de energia e a geração esperada via simulação, o que se viu foi uma diferença inferior a 5% entre elas.

- **Avaliação de energia gerada para plantas fixa e seguidor de dois eixos de arranjos FV (SENPINAR; CEBECI, 2011)**

Na cidade de Elazig (Turquia) dois arranjos FV idênticos foram instalados, sendo um montado de maneira fixa, e outro com um seguidor solar. O sistema fixo foi montado de modo que o ângulo de inclinação (*tilt*) fosse de 52,46° ao meio dia do dia 27 de outubro (melhor ângulo de inclinação para a região) e o arranjo ficasse orientado para o sul. O sistema fixo foi programado para acompanhar os movimentos aparentes do sol, em dois eixos, ao longo do dia.

Os dados de geração de energia foram coletados e armazenados por um computador. Considerando todo o período de dois dias que os autores realizaram, viu-se que, em média, a energia gerada pelo sistema seguidor é 13,25% maior do que a energia gerada pelo sistema fixo. Salienta-se que em um dos dias de análise o dia estava ensolarado, enquanto no outro estava meio nublado. As figuras 9 e 10 mostram as duas estruturas estudadas:

Figura 9– Módulo FV Fixo.



Fonte: SENPINAR; CEBECL., 2011

Figura 10 - Módulo FV em seguidor solar.



Fonte: SENPINAR; CEBECL., 2011

- **Análise comparativa de produtividade de diferentes plantas com seguimento solar em clima semiárido: O caso do Irã. (MIRZAEI; MOHIABADI, 2017)**

Neste estudo o foco está em analisar o desempenho de três sistemas FV com seguidor solar, cada um com seu próprio modo de seguimento, instalados na cidade de Rafsanjan, localizada numa região com características climáticas de semiárido, no Irã. A análise foi feita comparando a energia gerada por cada um destes seguidores. Os 3 modos de seguimento utilizado pelos autores são descritos da seguinte maneira:

- 1) Seguimento contínuo: o módulo FV se move a cada quinze minutos;

- 2) 3P: o módulo FV é ajustado para três posições: manhã, meio-dia e tarde.
- 3) 2P: o módulo FV só opera em duas posições: manhã e tarde.

Uma das observações feitas com o estudo foi de que o seguimento contínuo e o seguimento com três posições recebem irradiação solar de tal modo que, no caso de um tempo claro, o ganho de energia solar é aproximadamente 30% maior do que uma planta no modo fixo. Em dias nublados, o ganho energético destes seguidores é menor que 20% em relação ao sistema fixo. Porém, considerando os consumos de energia para realizar o seguimento solar, estes ganhos passam a ser 23,4% em dias de céu claro e aproximadamente 14% em dias nublados.

Como forma de sintetizar a revisão dos estudos realizados no Brasil e no mundo a respeito dos seguidores solares, foram elaboradas as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1- Revisão dos estudos feitos sobre seguidor solar no Brasil.

| Referência | Principais pontos |
|---|---|
| <p>Análise comparativa para região de Farroupilha – RS (FROSI et al., 2018).</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Localizado em Farroupilha – RS; • Seguidor de dois eixos; • 1 módulo no seguidor; • 25,4% de ganho energético em relação à planta fixa. |
| <p>Desenvolvimento de sistema automático de rastreamento (ORTIZ et al., 2018)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Planta de rastreamento automático utilizando LDR's, motores de passo e Arduino; • Seguidor de dois eixos • Ganho médio de 26% na produção de energia em relação à planta fixa. |
| <p>Avaliação do desempenho de um seguidor solar monoaxial para sistemas FV isolados (BARBOSA et al., 2016)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Seguidor de um eixo; • Ganho energético de 20,72% para o seguidor com controle em malha aberta; • Ganho energético de 27,42% para o seguidor com controle em malha fechada. |
| <p>Como otimizar a produção e a eficiência de usinas fotovoltaicas com o uso de rastreadores solares (LIMA; SARRADE, 2016)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Rastreadores de um eixo; • Localizado em Pernambuco; • Produtividade de 29,5% a mais do que uma planta fixa convencional; • Pico do ganho foi de 35,5% no mês de novembro. |
| <p>Geração solar fotovoltaica com sistema de rastreamento de dois eixos no município de Jaguari – RS. (NASCIMENTO et al., 2018)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Rastreador de dois eixos; • Ganho considerável na absorção da irradiação no início e no fim dos dias de céu limpo; • Absorção de irradiância em dias nublados praticamente iguais para as plantas de rastreamento e fixo; • Em média, a irradiação global normal é 30% maior na planta de rastreamento; • Fator de capacidade de 19,8%. |

Fonte: o próprio autor.

Tabela 2 - Revisão dos estudos feitos sobre seguidor solar no Exterior.

| Referência | Principais pontos |
|---|--|
| <p>Produção de energia de sistemas FV: fixos, seguidores e concentradores</p> <p>(GIL; WANG; BARNETT, 2011)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Seguidor de um eixo; • Seguidor de dois eixos; • Em simulações, obteve-se ganhos de 32,1% para seguidores de um eixo e 38,7% para seguidores de dois eixos em relação as plantas fixas; • Ganhos reais no ano de 2009: 22,3 para seguidor de um eixo / 25,2 para plantas de dois eixos. |
| <p>Comparação de desempenhos entre um rastreador solar de dois eixos e um sistema fotovoltaico fixo</p> <p>(EKE; SENTURK, 2012)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Duas plantas de seguidores solar; • Plantas de 7,9 kWp; • Plantas com mesmos módulos e inversores; • Seguidor solar com produtividade 30% maior do que o fixo. • Diferença entre gerações de energia reais e simuladas menor do que 5%. |
| <p>Avaliação de energia gerada para plantas fixa e seguidor de dois eixos de arranjos FV</p> <p>(SENPINAR; CEBECI, 2011)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Uma planta com ângulo fixo de 52,46° e outra com seguidor solar; • O seguidor solar possui 2 eixos; • Dois dias de análise: um dia com céu claro e outro dia com céu nublado; • Seguidor solar tem ganho médio de energia gerada de 13,25% em relação ao sistema fixo. |
| <p>Análise comparativa de produtividade de diferentes plantas com seguimento solar em clima semiárido: O caso do Irã.</p> <p>(MIRZAEI; MOHIABADI, 2017)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Estudo realizado em uma região de clima semiárido; • Três tipos de seguidor solar; • O seguidor solar contínuo e seguidor de três posições possuem desempenhos semelhantes: geração de energia 30% maior em dias de céu claro e menos de 20% em dias nublados (em relação ao sistema fixo). |

Fonte: o próprio autor.

3. DESCRIÇÃO DAS PLANTAS

A instalação dos Geradores Solares Heliotrópicos (palavra derivada da heliotropia, movimento de flores, folhas e hastes que seguem os movimentos aparentes do sol), equipamento com a capacidade de realizar seguimento solar, desenvolvido pela empresa Autoterm Energias, foi realizada numa área dentro do terreno que tem como proprietário o Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, campus Lagoa Seca, localizada no município de Juazeiro do Norte, no chamado Cariri, região sul do estado do Ceará.

A área em que estão instalados os Geradores Heliotrópicos se encontra em obras (junho de 2019). Parte desta área será reservada para receber um centro esportivo, composto por duas quadras de vôlei, uma quadra poliesportiva e uma piscina além de um vestiário. Outra parte será reservada para um estacionamento de veículos de passeio. A localização geográfica da área é 39,31° sul, 7,25° oeste.

Ao todo, serão instalados 63 Geradores Heliotrópicos, distribuídos em 9 (nove) fileiras compostas por 7 (sete) geradores. Estas filas estarão dispostas ao longo de todo o terreno, sendo instalados entre divisões de áreas de estacionamento e entre as quadras e piscinas. Como cada fileira de geradores possui potência instalada de 60,06 kWp, toda a composição formará uma planta de geração FV com potência instalada de 540,54 kWp.

Considerando a instalação fotovoltaica já existente com módulos FV instalados de maneira convencional, isto é, fixados em estrutura estáticas instaladas em telhados e lajes de edificações existentes dentro dos mesmos terrenos, de 208,08 kWp, a planta de geração fotovoltaica total do Instituto de Ensino terá potência instalada de 748,62 kWp.

Salienta-se que neste trabalho é dada maior atenção para a primeira das 9 (nove) fileiras previstas, com 60,06 kWp de potência instalada. Também é descrita a planta FV com placas fixas, com o intuito de fazer uma comparação de alguns aspectos existentes entre as plantas de seguimento solar e fixo. As figuras 11 e 12 mostram imagens de satélite do local onde estão instaladas as duas plantas FV.

Figura 11 – Imagem de satélite de Juazeiro do Norte com a localização do Instituto Leão Sampaio.



Fonte: GOOGLE, 2019.

Figura 12 – Imagem de satélite da área pertencente ao instituto de ensino.



Fonte: GOOGLE, 2019.

Neste capítulo é dado um detalhamento geral das plantas, dando uma larga atenção para as características dos módulos FV e inversores utilizados.

3.1 Planta Fixa:

A planta fixa estudada é constituída de 816 módulos FV com potência nominal de 255 Wp, totalizando uma planta de 208,08 kWp de potência instalada. Esta planta foi inaugurada em fevereiro de 2016 e funciona ininterruptamente na modalidade conectada à rede elétrica (*ONGRID*) desde então.

A instalação é dividida em 10 partes de aproximadamente 20 kWp cada uma. Duas destas partes foram instaladas em estruturas que, com a fixação dos módulos, produzem sombras em um dos estacionamentos do estabelecimento. As partes restantes foram instaladas em telhados de edificações previamente existentes no instituto de ensino.

Por conta destas disposições, as orientações dos módulos FV de algumas partes da planta sejam distintas entre si, isso faz com que a planta acabe tendo um rendimento abaixo daquele que seria possível se a instalação dos módulos FV fossem orientados da melhor maneira possível.

3.1.1 Módulo FV

Na planta solar estática de 208,08 kWp instalados nos tetos de vários blocos ao longo da área ocupada pelo instituto de ensino, são utilizados 816 módulos FV da fabricante CANADIAN SOLAR INC, modelo c. Estes módulos são constituídos de células de silício policristalino e suas certificações internacionais são as seguintes:

- ISO 9001:2008 / Quality management system;
- ISO/TS 16949:2009 / The automotive industry quality management system;
- ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system;
- OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety.

Segundo o datasheet do módulo, a vida útil do produto é de 25 anos e a garantia contra defeitos de fabricação é de 10 anos, diretamente com a fabricante. As especificações elétricas, mecânicas e térmicas do módulo CS6P-255P são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do módulo FV utilizado na planta fixa.

| Dados elétricos | |
|---|--------------------|
| Potência nominal máxima (Pmax) | 255 W |
| Tensão nominal (Vmp) | 30,2 V |
| Corrente nominal (Imp) | 8,43 A |
| Tensão de circuito aberto (Voc) | 37,4 V |
| Corrente de curto-circuito (Isc) | 9,00 A |
| Eficiência | 15,85% |
| Temperatura de operação | -40 °C ~ 85 °C |
| Tensão máxima | 1000V (IEC) |
| Dados mecânicos | |
| Tipo de célula | Policristalina |
| Dimensões | 1638 x 982 x 40 mm |
| Peso | 18 kg |
| Características de Temperatura | |
| Coeficiente de temperatura (Pmax) | -0,43 %/ °C |
| Coeficiente de temperatura (Voc) | -0,34 %/ °C |
| Coeficiente de temperatura (Isc) | 0,065 %/ °C |
| Temperatura nominal de operação das células | 45±2 °C |

Fonte: Adaptada do Datasheet (CS6P-255P).

3.1.2 Inversor Solar:

Os módulos FV utilizados na instalação fixa de 208,08 kWp são distribuídos em 10 equipamentos. Próximo ao local de instalação de cada uma destas partes, está instalado um inversor Ingecon Sun 3Play 20TL M P da fabricante INGETEAM, como o mostrado na figura 13. A figura 14 mostra o diagrama esquemático dos componentes internos do inversor.

Figura 13 - Inversor solar Ingecon Sun 3Play 20TL M P.



Fonte: Datasheet Ingecon Sun 3Play 20TL M P (INGETEAM).

Podendo trabalhar em conjunto com plantas FV de potência instalada entre 20,6 e 26,8 kWp, este inversor tem, entre seus diversos aspectos e funcionalidades, duas entradas MPPT independentes, que permitem configurações de *strings* assimétricas; acabamento de aço, concebido para instalações interiores ou exteriores com grau de proteção IP65, podendo alcançar uma vida útil de mais de 20 (vinte) anos; *software* integrado para monitorização e registro de dados do inversor através da internet.

Este inversor é equipado com fusíveis CC, medição de correntes, seccionador CC, DPS no lado CC e varistores CC e CA tipo III. O sistema de proteção integrado age contra polarização inversa, curtos-circuitos e sobrecargas na saída, falhas de isolamento, sobretensões CC e CA e ilhamento, e possui total conformidade com, entre outras, as normas IEC 62116, IEC 61727, ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, IEEE 929.

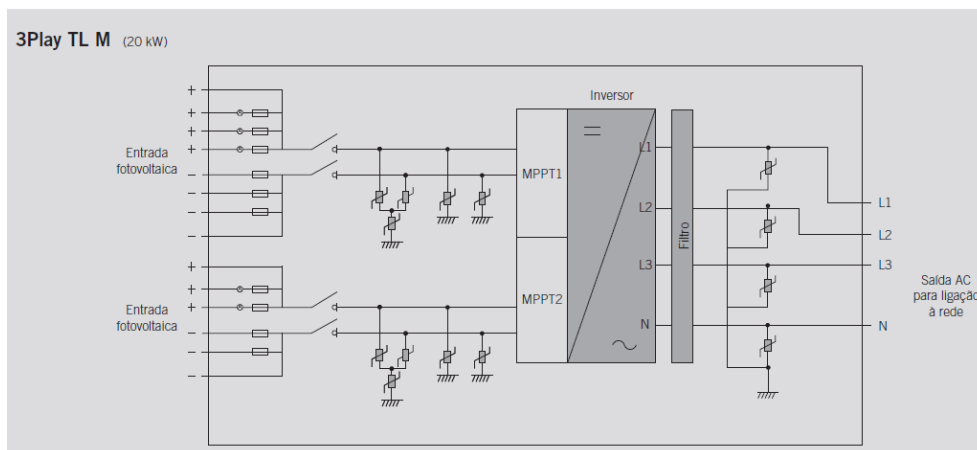
Os dados e especificações do Ingecon Sun 3Play 20TL M são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 - Dados do inversor solar Ingecon Sun 3Play 20TL M P.

| Dados elétricos (entrada) | |
|---------------------------------------|--------------------|
| Potência FV recomendada | 20,6-26,8 kW |
| Tensão CC máxima | 1000 V |
| Nível de tensão MPP1 | 200-800 V |
| Nível de tensão MPP2 | 200-800 V |
| Corrente CC máxima (MPP1/MPP2) | 30 / 20 A |
| Dados elétricos (saída) | |
| Potência CA | 20 kW |
| Corrente CA máxima | 29 A |
| Tensão CA nominal | 400 V |
| Nível de tensão CA | 187 – 528 V |
| Frequência nominal | 50/60 Hz |
| Tipo de rede | TT / TN |
| Fator de potência na potência nominal | 1 |
| THD | < 3% |
| Proteções | |
| Conexão CC reversa | Sim |
| Curto-circuito CA | Sim |
| Fuga de corrente | Não |
| Monitoramento de rede | Sim |
| Chave de seccionamento CC | Sim |
| Chave de seccionamento CA | Não |
| Fusível CC | Sim |
| Monitoramento de correntes CC | Sim |
| Proteção de Sobretensão | Tipo III (CC e CA) |
| Outros dados | |
| Eficiência máxima | 98,5% |
| Dimensões | 706 x 735 x 268 mm |
| Peso | 57,8 kg |
| Grau de proteção | IP65 |

Fonte: Adaptada do Datasheet SG60KTL (Sungrow).

Figura 14 – Diagrama do circuito elétrico Ingecon Sun 3Play 20TL M P.



Fonte: Datasheet Ingecon Sun 3Play 20TL M P (INGETEAM).

3.2 Planta de Geradores Heliotrópicos:

Na planta de rastreamento solar dos Geradores Solar Heliotrópicos tem-se uma estrutura eletromecânica de grande porte, que suspende os seus 26 módulos FV de sua estrutura a mais de 7 metros do solo, o que possibilita o gerador de realizar seus movimentos de seguidor solar e ainda permite que o local onde os mesmos são instalados seja aproveitado para alguma outra utilidade, como o estacionamento e centro esportivo do campus Lagoa Seca do Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, na cidade de Juazeiro do Norte, no Ceará.

Os módulos FV e inversores utilizados nestas instalações não possuem nenhuma adaptação ou característica especial para esta aplicação, são equipamentos comerciais convencionais, facilmente encontrados no mercado brasileiro.

3.2.1 Módulo FV.

Os módulos FV utilizados no Gerador Solar Heliotrópico são fabricados pela CANADIAN SOLAR INC. São constituídos de células de silício policristalino. O modelo destes módulos é o CS6U-330P. As certificações internacionais de qualidade destes módulos, segundo o datasheet do próprio módulo, são:

- ISO 9001:2008 / Quality management system;
- ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system;
- OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety.

A garantia do produto é de 10 (dez) anos contra defeitos de fabricação diretamente com o fabricante e vida útil de 25 anos (Datasheet CS6U-330P). Os dados deste módulo são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 - Dados do módulo FV utilizado no Gerador Solar Heliotrópico.

| Dados elétricos | |
|---|--------------------|
| Potência nominal máxima (Pmax) | 330 W |
| Tensão nominal (Vmp) | 37,2 V |
| Corrente nominal (Imp) | 8,88 A |
| Tensão de circuito aberto (Voc) | 45,6 V |
| Corrente de curto-circuito (Isc) | 9,45 A |
| Eficiência | 16,97 % |
| Temperatura de operação | -40° C ~ 85° C |
| Tensão máxima | 1500 V (IEC) |
| Dados mecânicos | |
| Tipo de célula | Policristalina |
| Dimensões | 1960 x 992 x 40 mm |
| Peso | 22,4 kg |
| Características de Temperatura | |
| Coefficiente de temperatura (Pmax) | -0,41 %/ °C |
| Coefficiente de temperatura (Voc) | -0,31 %/ °C |
| Coefficiente de temperatura (Isc) | 0,053 %/ °C |
| Temperatura nominal de operação das células | 45±2 °C |

Fonte: Adaptada do Datasheet (CS6U-330P).

Em cada Gerador Heliotrópico são instalados 26 (vinte e seis) destes módulos. A planta instalada possui 7 Geradores Heliotrópicos, sendo assim, é composta por 182 módulos. Porém, 11 (onze) destes módulos, que estão instalados em um dos geradores, serão utilizados em uma aplicação off-grid e, portanto, não são considerados na análise que é feita neste trabalho. Com isso, a análise considera o número de 171 módulos FV com potência nominal de 330 Wp, resultando em uma potência instalada de 56,43 kWp, que é a potência da planta que é conectada à rede elétrica da distribuidora de energia da região.

3.2.2 Inversor solar.

O inversor solar utilizado para realizar a conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos FV em corrente alternada (CA) é o SG60KTL (figura 15) da fabricante SUNGROW POWER SUPPLY CO. Este inversor possui como especificação de potência nominal, 60 (sessenta) kWp, podendo assim ser utilizado nesta instalação de 7 (sete) Geradores Heliotrópicos, que possuem potência nominal total de 56,43 kWp. O inversor SG60KTL possui conformidade com as normas IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, VDE0126-1-1, G59/3, VDE-AR-N-4105, VDE-AR-N-4120, BDEW.

O SG60KTL supervisiona a tensão e a frequência da rede com a qual está conectada, entrando em operação a partir do momento em que os valores estão dentro da faixa normal do regime de operação. Por ser um inversor do tipo GRID-TIE, seus componentes de proteção da conexão não permitem que o equipamento funcione de forma OFF-GRID (ou ilhada), assim sendo, caso o fornecimento da rede elétrica seja interrompido, o inversor para de funcionar, impedindo assim o fluxo de energia oriundo dos módulos FV. Esta proteção impede o inversor de funcionar em caso de perda ou anomalias de tensão e frequência na rede CA da concessionária, garantindo assim a segurança para os trabalhadores numa eventual rotina de manutenção.

No lado de corrente contínua (CC) dos inversores, são conectados os circuitos de corrente contínua que são compostos por um conjunto de módulos FV conectados entre si em série ou em paralelo ou um misto entre série e paralelo. O lado de corrente alternada (CA) deve ser conectado à rede elétrica da concessionária por meio de uma conexão entre sua saída CA e um quadro elétrico de distribuição, por exemplo. A Tabela 6 mostra as especificações elétricas do inversor solar SG60KTL e a figura 16 mostra o diagrama funcional do inversor.

Figura 15 - Inversor solar SG60KTL.



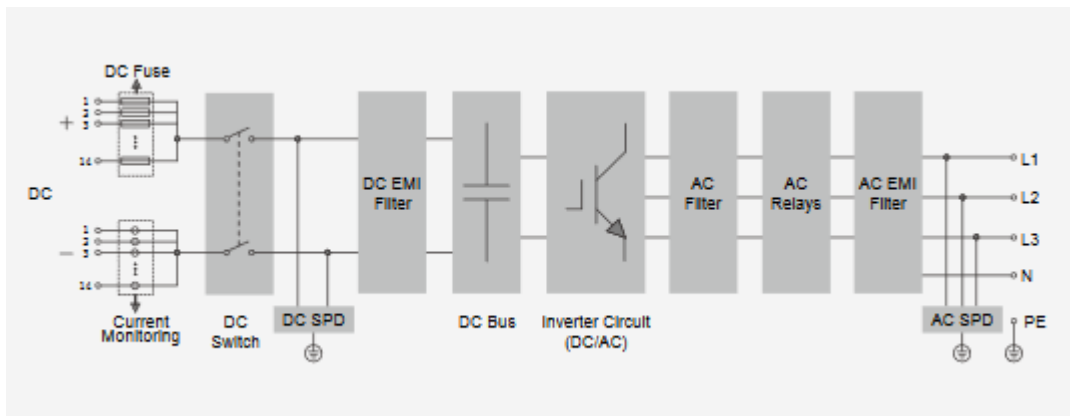
Fonte: Datasheet SG60KTL (Sungrow).

Tabela 6 - Dados do inversor solar SG60KTL.

| Dados elétricos (entrada) | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Potência nominal | 60 kW |
| Tensão CC máxima | 1000 V |
| Tensão CC mínima | 570 V |
| Tensão nominal | 710 V |
| Número de entradas CC | 14 |
| Corrente CC máxima | 120 A |
| Corrente CC máxima de um circuito | 12 A |
| Corrente de curto-circuito máxima | 140 A |
| Dados Elétricos (saída) | |
| Potência CA | 66000 VA @ 45 °C / 60000 VA @ 50 °C |
| Corrente CA máxima | 96 A |
| Tensão CA nominal | 3 / N / PE ou 3 / PE, 230/400 V |
| Faixa de tensão CA | 310 – 480 V |
| Frequência nominal | 50/60 Hz |
| Fator de potência na potência nominal | > 0,99 |
| Proteções | |
| Curto-circuito CA | Sim |
| Fuga de corrente | Sim |
| Monitoramento de rede | Sim |
| Chave de seccionamento CC | Sim |
| Chave de seccionamento CA | Não |
| Fusível CC | Sim |
| Monitoramento de correntes CC | Sim |
| Proteção de Sobretensão | Tipo II (CC) e Tipo III (CA) |
| Outros dados | |
| Eficiência máxima | 98,9% |
| Dimensões | 634 x 959 x 267 mm |
| Peso | 60 kg |
| Grau de proteção | IP65 |

Fonte: Adaptada do Datasheet SG60KTL (Sungrow).

Figura 16 - Diagrama do circuito elétrico SG60KTL.



Fonte: Datasheet SG60KTL (Sungrow).

3.2.3 Gerador Solar Heliotrópico.

Nos próximos tópicos serão descritos o princípio de funcionamento do gerador e, mais a frente, será feita uma explicação rápida sobre os aspectos construtivos do mesmo.

3.2.3.1 Movimento Leste-Oeste:

Para realizar o movimento Leste-Oeste, movimento de horário solar Gerador Heliotrópico se vale da técnica de atualizar a sua posição neste eixo de movimento Leste-Oeste de hora em hora. O ciclo de seguimento solar deste movimento se inicia às 6 (seis) da manhã, segue ao longo de todo o dia e se encerra às 18 (dezoito) horas, sempre se movendo no sentido Leste-Oeste.

Às 6 (seis) horas da manhã, o Gerador Heliotrópico, que se encontra com os módulos FV posicionados na posição horizontal (paralelamente ao solo), inicia o movimento para a posição mais extrema no sentido leste do ciclo a fim de aproveitar os primeiros raios solares do dia. Das 12 (doze) até as 13 (treze) horas o Gerador Heliotrópico está com os módulos FV posicionados na direção horizontal para captar a irradiação da luz do sol, que se encontra no topo do céu diurno. E, por fim, 17 (dezesete) horas o Heliotrópico posiciona os módulos para a posição mais extrema no sentido oeste, para absorver os últimos raios solares do dia e do seu ciclo diário de produção de eletricidade, permanecendo assim até as 18 (dezoito) horas.

Com a chegada das 18 (dezoito) horas, quando já não há mais luz solar (ou pouquíssima luz solar, dependendo da época do ano) para a planta captar, o Gerador realiza o último movimento do dia. Os módulos, que até então estavam posicionados na posição mais virada para o oeste possível, começam a se mover em direção ao leste e só

param o movimento ao chegar até o ponto onde se encontram novamente na posição horizontal (mesma posição do período de meio-dia até às 13 (treze) horas).

Este último movimento se faz necessário para que o Gerador Heliotrópico possa realizar a sua função secundária. No período noturno, como não há geração de energia elétrica, o gerador passa a ser utilizado como poste de iluminação. Valendo-se de sua estrutura com altura considerável, decidiu-se por instalar refletores com tecnologia LED de 200W e luz branca para fazer a iluminação da área onde os mesmos estão instalados. A posição horizontal é importante para esta função porque os refletores são instalados de forma que a luz expelida pelo refletor atinja primeiramente a superfície inferior dos módulos FV e a reflexão destes ilumine o ambiente.

Para os movimentos neste eixo, o Gerador Solar Heliotrópico utiliza um motor elétrico de indução com 3 (três) CV's de potência, com seu eixo acoplado diretamente a um redutor especial.

3.2.3.1 Movimento Norte-Sul:

O eixo polar da Terra possui uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação à normal do plano da órbita terrestre. Essa inclinação do eixo polar causa uma variação da trajetória do Sol entre o norte e o sul no decorrer do ano, ocasionando uma variação do ângulo de incidência dos seus raios em relação ao plano do equador. Esse ângulo é denominado de declinação. Por exemplo, um observador na linha do equador da Terra vê o Sol entre os dias 21 de março e 23 de setembro sempre ao norte, enquanto que, em todos os outros dias do ano, vê ao sul. A figura 17 mostra uma ilustração dos movimentos aparentes do sol na direção norte-sul ao longo de um ano (ROCHA FILHO, 2016).

Figura 17 - Movimento anual aparente do Sol na direção norte-sul, associado à variação da sua declinação.



Fonte: (SHAYANI, 2006).

O segundo eixo de rastreamento solar do Gerador Solar Heliotrópico é justamente o responsável por posicionar os módulos FV do gerador na posição ótima da direção norte-sul ao longo do ano. Diferentemente do movimento Leste-Oeste, que é diário e se move de hora em hora, o movimento norte-sul é feito uma vez no mês, com movimentos suaves e quase imperceptíveis. Em um ciclo anual deste movimento, o gerador passa 6 (meses) se movimentando no sentido norte-sul e outros 6 meses no sentido sul-norte.

Enquanto que para os movimentos da direção Leste-Oeste o Heliotrópico utiliza um motor com potência de 3 CV's, para os movimentos do eixo Norte-sul o mesmo utiliza um motor elétrico de indução de 0,5 (meio) CV com um redutor especial acoplado.

4. SIMULAÇÕES DAS PLANTAS

As simulações das plantas para levantamento dos dados de produções de energia elétrica mensais e anual, em kWh, foram realizadas no *software* SOLergo. O SOLergo é um dos mais conhecidos *softwares* para simulação de plantas FV em geral, tendo a capacidade de realizar simulações de plantas FV conectadas ou não à rede elétrica das concessionárias, ou ainda, simulações de sistemas híbridos. Dentre as mais variadas características presentes no SOLergo, pode-se destacar:

- Análise de sombreamento;
- modalidade de tarifação;
- Sistema de acúmulo;
- geração de memorial descritivo do sistema simulado;
- dimensionamento de inversor;
- lista de materiais;
- proposta comercial;
- proteção;
- diagramas elétricos;
- análise econômica;
- banco de dados de variados módulos FV e inversores comerciais.

Este *software* foi produzido pela Electro Graphics, empresa italiana referência em *softwares* que auxiliam projetistas e estudantes em estudos e projetos relacionados às instalações elétricas com dimensionamento de condutores e geração de esquemas elétricos.

A versão brasileira do SOLergo é distribuída exclusivamente pela Hiper Energy do Brasil Ltda. O *software* é pago, está completamente traduzido para o português e o banco de dados utilizado para as simulações é o Atlas Brasileiro de 2017.

A escolha do SOLergo como ferramenta para as simulações deste trabalho se deu por conta da afinidade com o mesmo conquistada pelo autor após usá-lo frequentemente durante as atividades de estágio.

4.1 Simulação da Planta Fixa:

A ideia principal deste trabalho é fazer uma comparação entre uma planta de geração FV convencional, isto é, com os módulos instalados em um determinado local e permanecendo nele estaticamente, e um planta de seguimento solar. Para realizar a

simulação da planta fixa instalada no instituto de ensino, considera-se que todos os módulos estão orientados e inclinados da melhor forma possível para que tal planta consiga captar a maior irradiação solar disponível na localidade e, portanto, conseguir as maiores produções energéticas.

4.1.1 Procedimento da simulação da planta fixa:

Após inicializar o programa, tem-se a tela inicial na qual são solicitados os dados gerais da planta a ser simulada: denominação do projeto, descrição, país, estado, cidade e endereço do local onde será instalado a planta. A figura 18 mostra esta tela inicial.

Figura 18 - Dados gerais da planta.

Fonte: o próprio autor.

O próximo passo é entrar no banco de dados de cidades e fazer a seleção da cidade que receberá a instalação FV da simulação. Há ainda a opção de selecionar um nível de albedo ou ajustar manualmente este nível. Albedo é o poder de reflexão de radiação solar do terreno. O valor de albedo de um terreno é caracterizado pelo tipo de solo. Na figura 19 é possível visualizar os diferentes tipos de albedo já disponibilizados pelo *software* e a entrada de dados de localização da planta.

Figura 19 - Dados de Localização da planta e níveis de albedo.

Localização
Local de instalação do sistema fotovoltaico.

Localidade: JUAZEIRO DO NORTE Selecionar

Latitude: 007°12'39\"S Longitude: 039°19'01\"W Altitude: 407,1 m

Fonte dados climáticos: ATLAS BRAS. 2017

Albedo

Reflexão média do terreno (albedo): 0% Selecionar

Digite albedo mensal

| Mês | Albedo | Descrição |
|-----------|--------|-----------|
| Janeiro | 0,0% | |
| Fevereiro | 0,0% | |
| Março | 0,0% | |
| Abril | 0,0% | |
| Maio | 0,0% | |
| Junho | 0,0% | |
| Julho | 0,0% | |
| Agosto | 0,0% | |
| Setembro | 0,0% | |
| Outubro | 0,0% | |
| Novembro | 0,0% | |
| Dezembro | 0,0% | |

Editar...
Copiar para todos

Valores de refletância para diversas superfícies

Selecione o tipo de superfície nas proximidades dos painéis fotovoltaicos.

| Tipo de superfície | Refletância |
|--|-------------|
| <input type="checkbox"/> Neve fresca ou camada de gelo | 75% |
| <input type="checkbox"/> Superfícies úmidas | 7% |
| <input type="checkbox"/> Solo (argila) | 14% |
| <input type="checkbox"/> Estradas não pavimentadas | 4% |
| <input type="checkbox"/> Bosque de coníferas no inverno | 7% |
| <input type="checkbox"/> Bosque de outono | 26% |
| <input type="checkbox"/> Campos com culturas maduras e plantas | 26% |
| <input type="checkbox"/> Asfalto envelhecido | 10% |
| <input checked="" type="checkbox"/> Concreto envelhecido | 22% |
| <input type="checkbox"/> Folhas mortas | 30% |
| <input type="checkbox"/> Grama seca | 20% |
| <input type="checkbox"/> Grama verde | 26% |
| <input type="checkbox"/> Telhados ou terraços com betume | 13% |
| <input type="checkbox"/> Cascalho | 20% |
| <input type="checkbox"/> Superfícies escuras de edifícios | 27% |
| <input type="checkbox"/> Superfícies claras de edifícios | 60% |

Refletância média: 22%

OK Cancelar

Fonte: o próprio autor.

Como é possível ver na figura 19 foi selecionado o tipo de piso ‘concreto envelhecido’. A maior parte dos módulos instalados na instalação fixa se encontram nas lajes coberturas em concreto das edificações interiores à faculdade, portanto, esta escolha é condizente.

Os próximos itens relevantes para realizar a simulação encontram-se na aba “Exposições” do SOLergo. Nesta aba deve-se selecionar o tipo de instalação dos módulos, sua orientação azimutal e, por fim, sua inclinação.

Na opção “Tipo de instalação” existem quatro opções para seleção:

- Ângulo fixo;
- Rastreador de um eixo (azimute);
- Rastreador de dois eixos;
- Rastreador de eixo inclinado.

Como a simulação descrita neste momento é relacionada a instalação estática, a opção selecionada neste item é “Ângulo fixo”. Na seção “Orientação de módulos FV” existem 3 dados para entrada do usuário: Orientação (azimute); Inclinação (*tilt*); Inclinação da superfície. A figura 20 mostra a interface do *software* para a entrada destes dados.

Figura 20 - Aba “Exposições”.

Exposições
Orientação e instalação de módulos fotovoltaicos, sombreamento e valores de irradiação sobre o plano dos módulos.

| Descrição | Orientação | Inclinação | Inclinação da s... | Sombreamento | Radiação solar líquida |
|-------------|------------|------------|--------------------|--------------|-----------------------------|
| Exposição 1 | 180° | 5° | 0° | 0 % | 2134,1 kWh/m ² a |
| | | | | | |
| | | | | | |

Orientação Sombreamento Radiação solar

Tipo de Instalação: Ângulo fixo

Orientação de módulos fotovoltaicos

Oeste +90° Norte
Sul Leste -90°

Orientação (azimute): 180°

Inclinação (tilt): 5°

Inclinação da superfície: 0°

Fonte: o próprio autor.

Para o melhor aproveitamento da radiação solar, a orientação de módulos FV que são instalados no hemisfério sul do planeta deve ser voltada para o norte. Importante visualizar que no SOLergo a referência para o ângulo de orientação é o sul, portanto, para que a orientação seja o norte a entrada deve ser 180°.

Quanto ao ângulo de inclinação (*tilt*) dos módulos, recomenda-se utilizar o ângulo da latitude do local de instalação. Neste caso, este ângulo seria 7°, visto que a latitude da cidade de Juazeiro do Norte é de 7°12' sul, porém, o próprio SOLergo tem uma função que indica as orientações e inclinações ideais para os maiores valores de radiação solar líquida. Nesta simulação aceitaremos tal sugestão.

A inclinação da superfície solicitada pelo SOLergo nesta simulação é 0°, visto que os módulos estão instalados em lajes planas. Sendo assim, temos que a orientação dos módulos é para o norte, com inclinação de 5° (ângulo sugerido pelo *software*).

Em seguida, os componentes da planta FV estudado são declarados na seção “Componentes”. Primeiramente, o SOLergo solicita o modelo do módulo FV utilizado na instalação. Aqui existe a opção de selecionar um modulo FV que se encontra presente no banco de dados do software com todas as características mais importantes do módulo já declarados, como potência nominal, dimensões, coeficientes de temperatura, rendimentos e etc. Caso um determinado módulo selecionado não esteja

presente no banco de dados há a opção de declarar manualmente as características de um módulo e acrescentá-lo a este banco de dados. Nesta simulação, o módulo Canadian CS6P-255P já se encontra neste banco de dados. Ao selecioná-lo, o sistema do *software* se encarrega de importar todos os dados do módulo.

O próximo item é o inversor solar. Também há um banco de dados de inversores comerciais para seleção rápida, bem como na seleção dos módulos. Após indicar a potência da planta FV e usar o dimensionamento assistido disponibilizado pelo SOLergo, os dados do inversor INGETEAM Ingecon Sun 3Play 20TL M P foram carregados. Depois da seleção do inversor, obrigatoriamente, é necessário indicar as *strings* que são conectadas ao inversor para que a simulação seja realizada. A figura 21 mostra a aba “Componentes”, que além da seleção de componentes, também já indica a energia total produzida anualmente pela planta descrita.

Figura 21 - Aba “Componentes”.

Componentes
Tipo de módulos fotovoltaicos, inversor e proteções. Dados de dimensionamento.

Módulo fotovoltaico

Módulo fotovoltaico: CSI CANADIAN SOLAR INC Quartech CS6P-255P [Selecionar...]

Potência nominal: 255 Wp Área: 1,61 m² [Propriedades]

Usar otimizador de potência
<Nenhum otimizador configurado> [Propriedades]

Inversor

Temperatura de operação Mínimo: 20 °C Máximo: 45 °C

O número de módulos: 816 Área total: 1313,76 m² Potência: 208,08 kWp [Calcula...]

[Dimensionamento assistido]

Inversor: INGETEAM S.A. 20TL M P (60Hz) [Seleção manual]

Número de inversores: 10 Nº máximo de ingressos utilizados: 1 [Propriedades]

Rastreadores simétricos: Inv. 1 Inv. 2 Inv. 3 Inv. 4 Inv. 5 Inv. 6 Inv. 7 Inv. 8 Inv. 9 Inv. 10

| | Número de rastreadores | MPPT 1 | MPPT 2 |
|-------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| Módulos em série | 21 | 21 | 21 |
| Conjunto de módulos paralelos | 2 | 2 | 2 |
| Exposição | Exposição 1 ... | Exposição 1 ... | Exposição 1 ... |
| Tensão de MPP (STC) | 634,2 V | 634,2 V | 634,2 V |
| Número de módulos | 42 | 42 | 42 |

Verificações elétricas

Tensão: ✓
Corrente: ✓
Potência: ✓

Dimensionamento Mesma configuração para todos os inversores

Número total de módulos: 816 Potência total: 208,08 kWp [Dispersões]

Energia produzida anualmente: 342.336 kWh Rácio dimensionamento: 102,5% [Proteções]

Fonte: o próprio autor.

Por fim, o relatório final do SOLergo detalha, entre um número grande de aspectos sobre a simulação, a produção de energia, em kWh, mês a mês. A tabela 7 traz estas produções mensais diretamente retiradas do relatório geral do SOLergo.

Tabela 7 - Dados de simulação de produção de energia elétrica diárias e mensais da planta fixa.

| Mês | Produção diária (kWh) | Produção Mensal (kWh) |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Janeiro | 920,609 | 28.538,89 |
| Fevereiro | 924,171 | 25.876,778 |
| Março | 930,641 | 28.849,879 |
| Abril | 897,238 | 26.917,141 |
| Maio | 846,51 | 26.241,823 |
| Junho | 816,208 | 24.486,245 |
| Julho | 871,614 | 27.020,031 |
| Agosto | 977,27 | 30.295,357 |
| Setembro | 1.045,172 | 31.355,166 |
| Outubro | 1.034,837 | 32.079,933 |
| Novembro | 1.026,197 | 30.785,906 |
| Dezembro | 964,158 | 29.888,886 |

Fonte: Adaptada do relatório de simulação SOLergo.

Relembrando, os dados mostrados na Tabela 7 foram obtidos através da simulação do SOLergo que tem como fonte o ATLAS BRASILEIRO 2017 e o Atlas Solarimétrico do Brasil. Na tabela 8 pode-se observar um pequeno resumo de informações importantes resultantes da simulação.

Tabela 8 - Resumo das informações mais importantes da simulação.

| Dados elétricos | |
|---|---|
| Coordenadas do local da instalação | Lat 7° 12' 39" Sul – Long 39° 19' 01" Oeste |
| Potência instalada (kWp) | 208,08 |
| Albedo (%) | 22 |
| Tipo de instalação | Ângulo Fixo |
| Orientação dos módulos | Norte |
| Inclinação dos módulos | 5° |
| Produção total anual (kWh) | 342.336 |
| Produção média mensal para os 12 meses (kWh) | 28.528 |
| Potência anual gerada por potência instalada (kWh/kWp) | 1.645,21 |
| Mês com menor produção | Junho |
| Mês com maior produção | Outubro |

Fonte: o próprio autor.

4.2 Simulação da planta de seguidor solar:

Assim como são mostrados os passos dados pelo usuário para fazer a simulação da planta fixa, a seguir também é mostrado todo o procedimento para a simulação da planta de seguimento solar. Os componentes e parâmetros de simulação são os mesmo que podem ser encontrados no local de instalação real da planta estudada.

4.2.1 Procedimento da simulação da planta de seguidor solar:

Nesta tela, ao selecionar a opção “Rastreador de dois eixos” no item “Tipo de Instalação” já é possível observar a diferença existente nos valores de “Radiação solar líquida” das plantas com Rastreadores de dois eixos (2757,4 kWh/m²ano) e Fixo (2134,1 kWh/m²ano). A figura 22 mostra a aba “Exposições” para o rastreador solar.

Figura 22 - Aba “Exposições” – Rastreador solar

Fonte: o próprio autor.

É na aba “Componentes” que são selecionados os módulos FV e inversores utilizados na instalação real. Assim como os dados dos módulos e inversores da instalação fixa já fazem parte do banco de dados do SOLergo, o módulo CS6U-330-FG e o inversor SG60KTL também tem suas características guardadas no *software*. A figura 23 mostra o módulo e inversor selecionado, bem como o número de módulos, a configuração de entrada do inversor e a energia total produzida anualmente com tal configuração.

Figura 23 - Aba “Componentes” – Rastreador solar.

Fonte: o próprio autor.

Finalizada as configurações para a simulação, o SOLergo emite seu relatório final, contendo todos os dados resumidos da simulação para auxiliar os montadores durante a instalação. Mas para este trabalho os dados mais importantes deste relatório são as gerações de eletricidade mostrados na Tabela 9:

Tabela 9 - Dados de simulação de produções de energia elétrica diárias e mensais de Rastreador Solar.

| Mês | Produção diária (kWh) | Produção Mensal (kWh) |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| Janeiro | 318,339 | 9.868,519 |
| Fevereiro | 306,082 | 8.570,298 |
| Março | 305,997 | 9.485,914 |
| Abril | 297,9 | 8.937,008 |
| Mai | 292,072 | 9.054,234 |
| Junho | 290,155 | 8.704,656 |
| Julho | 313,417 | 9.715,933 |
| Agosto | 344,826 | 10.689,608 |
| Setembro | 360,161 | 10.804,845 |
| Outubro | 360,475 | 11.174,712 |
| Novembro | 364,246 | 10.927,378 |
| Dezembro | 340,324 | 10.550,057 |

Fonte: Adaptada do relatório de simulação SOLergo.

Da mesma maneira como a Tabela 8 mostra os dados e informações mais importantes à cerca da simulação da planta estática, a Tabela 10 mostra os mesmos aspectos para a simulação da planta de seguimento solar, para que se possa realizar uma comparação direta entre as duas plantas simuladas.

Tabela 10 - Resumo das informações mais importantes da simulação.

| Dados elétricos | |
|--|--|
| Coordenadas do local da instalação | Lat 7° 12' 39" Sul Long 39° 19' 01" Oeste |
| Potência instalada (kWp) | 56,43 |
| Albedo (%) | - |
| Tipo de instalação | Seguidor Solar de 2 eixos |
| Orientação dos módulos | - |
| Inclinação dos módulos | - |
| Produção total anual (kWh) | 118.433,2 |
| Produção média mensal para os 12 meses (kWh) | 9.873,6 |
| Energia anual gerada por potência instalada (kWh/kWp) | 2.098,76 |
| Mês com menor produção | Fevereiro |
| Mês com maior produção | Outubro |

Fonte: o próprio autor.

5. INSTALAÇÃO DA PLANTA FV COM SEGUIDORES

Neste capítulo são tratados todos os pontos importantes a respeito da instalação das estruturas dos seguidores, instalações de cunho civil e elétrico (instalações em corrente contínua e instalações em corrente alternada) necessários para o funcionamento seguro e eficaz dos seguidores. São mostradas e explicadas algumas das peculiaridades que são características deste modelo específico de seguidor solar, algumas das soluções encontradas para as dificuldades apresentadas.

5.1 Aspectos construtivos

Nas imagens presentes neste tópico são mostradas algumas das partes do Gerador Heliotrópico. A fabricação destas peças foi totalmente realizada dentro da área onde se desenvolvem as obras, mas em um espaço um pouco mais reservado.

Dentro da oficina ocorrem todos os processos de fabricação de um Gerador Solar Heliotrópico, dos quais podem ser listadas as operações de caldeiraria, usinagem, ajustagem e soldagem. Além da fabricação, algumas montagens ocorrem dentro da oficina. A figura 24 mostra uma fotografia da oficina.

Figura 24 – Oficina.



Fonte: O próprio autor.

5.1.1 Base de concreto

A base de concreto, responsável por suportar a carga de todo o Gerador Heliotrópico tem área superficial de 1 metro quadrado, tendo largura e comprimento iguais, com 1 (um) metro. Isto significa que, para efeitos práticos, cada Gerador

Heliotrópico consome 1 (um) metro quadrado da área disponibilizada para sua instalação.

O instituto de ensino tem um contrato com uma construtora para realizar as obras de pavimentação e edificações do centro esportivo e estacionamento. Esta construtora também é responsável pela construção destas bases de concreto. A figura 25 mostra um detalhe da base de concreto do gerador.

Figura 25 – Base de concreto do gerador.



Fonte: O próprio autor.

5.1.2 Tronco

O tronco do Gerador Heliotrópico é fabricado a partir de uma sequência de processos mecânicos que tem como matéria-prima chapas de aço. Na parte inferior do tronco do gerador há uma área interna que abriga o conjunto motor-redutor, responsável pelos movimentos do eixo Leste-Oeste do gerador.

Há ainda, na área interna do tronco, dois eletrodutos com comprimentos iguais ao comprimento do tronco, um para abrigar os cabos de corrente alternada necessários para o acionamento do motor do eixo norte-sul e dos refletores de iluminação (ambos instalados no chamado “helicóptero” do Gerador Heliotrópico), e o segundo para abrigo dos cabos de corrente contínua que são conectados nos conjuntos de módulos FV na parte mais superior. A figura 26 mostra detalhes da parte mais inferior do tronco do gerador, e a figura 27 mostra 5 troncos de geradores dispostos em linha.

Figura 26 - Detalhe da parte mais inferior do tronco do gerador.



Fonte: O próprio autor.

Figura 27 - Troncos instalados formando uma fila



Fonte: O próprio autor.

5.1.3 Helicóptero

O chamado “helicóptero”, nomenclatura dada pelos funcionários da oficina responsável pela fabricação das estruturas do Gerador Heliotrópico, é a estrutura na qual são fixados o conjunto motor-redutor responsável pelos movimentos do eixo norte-sul do gerador e os refletores utilizados para a iluminação.

No helicóptero são instalados os eixos dos dois movimentos de seguimento. O helicóptero é ainda utilizado para receber a próxima estrutura do gerador, a chamada “grade”. As matérias-primas para a fabricação do helicóptero são chapas de aço e tubos retangulares de metalon galvanizado. A figura 28 mostra 2 helicópteros após fabricação e pintura.

Figura 28 - Helicóptero.



Fonte: O próprio autor.

5.1.4 Grade

A grade é a estrutura do Gerador Heliotrópico que está diretamente apoiada no helicóptero e é a mesma estrutura no qual os módulos FV do gerador são fixados. O mesmo é totalmente fabricado com tubos quadrados de metalon galvanizado, se valendo basicamente de cortes e soldas para fazer a junção de um tubo no outro. A figura 29 mostra um conjunto de grades empilhadas depois de sua fabricação, e a figura 30 mostra uma grade logo após a pintura. A figura 31 indica como devem ficar os módulos após sua fixação nas grades.

Figura 29 - Grades empilhadas logo após fabricação.



Fonte: O próprio autor.

Figura 30 - Grade após pintura.



Fonte: O próprio autor.

Figura 31 - Esquema da disposição dos módulos FV.

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |

Fonte: O próprio autor.

5.2 Procedimento de instalações

O início dos procedimentos para realizar as instalações dos Geradores Heliotrópicos se dá com as construções das bases de concreto. As sete bases são construídas com chumbadores (barras rosqueadas) posicionadas em pontos específicos da base, de forma que uma parte destas barras fiquem sobressalientes na superfície e a chapa de aço com furos presente na base do tronco do Gerador Heliotrópico encaixe perfeitamente nestas barras. Após o encaixe ter sido completado, um montador coloca porcas em todas as barras e faz os devidos apertos para concluir a fixação do tronco na base de concreto. Na figura 32 tem-se um detalhe da face superior de uma base de

concreto, mostrando as barras rosqueadas para fixação dos troncos e os eletrodutos utilizados nos cabeamentos elétricos do gerador.

Figura 32 - Detalhe da face superior da base de concreto.



Fonte: O próprio autor.

Para realizar o encaixe do tronco do gerador em sua base de concreto, se faz necessário o uso de um caminhão do tipo munck para que se possa suspender o tronco do gerador e os montadores em campo façam manualmente o encaixe na base de concreto. Na figura 33 vê-se o caminhão munck suspendendo um tronco de gerador com o auxílio de um montador.

Figura 33 - Caminhão “munck” suspendendo o tronco de um gerador.



Fonte: O próprio autor.

Na construção da base de concreto são alocados, além das barras rosqueadas para fixação dos geradores, 2 (dois) eletrodutos rígidos para instalação dos cabos elétricos que devem chegar até o gerador. Após a concretagem, encontram-se disponíveis uma extremidade de cada eletroduto na superfície da base, as outras duas extremidades estão disponíveis em duas paredes opostas da base de concreto. A figura 34 mostra um eletroduto em uma das faces laterais da base de concreto.

Figura 34 - Detalhe do eletroduto instalado na base de concreto.



Fonte: O próprio autor.

São dois eletrodutos instalados porque a ideia que os projetistas tiveram aqui foi de separar os cabos dos circuitos em corrente contínua dos cabos dos circuitos em corrente alternada. Em caso de uma manutenção, esta separação pode ser um aspecto facilitador do serviço.

Junto com o início da fixação dos troncos dos geradores nas bases de concreto, tem-se o início das escavações das valas que recebem os eletrodutos e construção das caixas de passagem que irão auxiliar as instalações elétricas. Há ainda o início da construção do abrigo do quadro elétrico de comando e do inversor solar, trata-se uma edificação em alvenaria instalada próxima ao Gerador Heliotrópico central da fileira de geradores. A figura 35 mostra um trabalhador executando uma escavação de valas no solo.

Figura 35 - Escavações para instalações elétricas.



Fonte: O próprio autor.

O solo do canteiro de obras estava bastante compactado e apresentava uma grande dificuldade para os trabalhadores no início das escavações. Então surgiu a ideia de molhar todo o solo e permitir que o mesmo absorvesse a água aplicada para que posteriormente as escavações continuassem. A figura 36 mostra um buraco no solo em formato quadrado com água. A figura 37 mostra uma caixa de passagem em alvenaria pronta e a figura 38 mostra a construção do abrigo. Figura 35

Figura 36 - Detalhe de escavação para caixa de passagem.



Fonte: O próprio autor.

Figura 37 - Caixa de passagem em alvenaria.



Fonte: O próprio autor.

Figura 38 - Construção do abrigo.



Fonte: O próprio autor.

Com os troncos dos geradores em seus lugares, as valas já cavadas, as caixas de passagem em alvenaria construídas e o abrigo em processo de construção, os eletricitistas e seus auxiliares, começam efetivamente as instalações elétricas com a colocação dos eletrodutos que recebem os cabos elétricos em corrente contínua e em corrente alternada nas valas cavadas no passo anterior. A figura 39 mostra os eletrodutos utilizados na instalação e alguns eletrodutos já instalados em uma vala.

Figura 39 - Instalação de eletrodutos.



Fonte: O próprio autor.

Após a colocação dos eletrodutos conectando uma caixa de passagem à outra, pode-se iniciar o cabeamento dos circuitos elétricos. Aqui, os eletricitas fazem o cabeamento sempre no sentido gerador-abrigo, isto é, uma extremidade de cada circuito fica disponível nos geradores enquanto as outras extremidades são levadas até o abrigo. Na figura 40 se vê os cabos elétricos na base do gerador.

Figura 40 - Cabos na base do gerador.



Fonte: O próprio autor.

Ao mesmo tempo em que o cabeamento elétrico é feito, os montadores que concluíram a fixação dos troncos dos geradores nas bases de concreto fazem agora a fixação dos módulos FV nas grades. Uma outra equipe trabalha na construção do abrigo do quadro de comando e do inversor solar, bem como realizando a instalação dos mesmos no momento em que concluem a construção. A figura 41 mostra três módulos

FV fixados em uma grade e a figura 42 mostra o inversor solar instalado em uma parede do abrigo.

Figura 41 - Fixação de módulos FV em grade.



Fonte: O próprio autor.

Figura 42 - Inversor solar instalado em parede do abrigo.



Fonte: O próprio autor.

Completado todo o cabeamento que sai dos geradores e vai até o abrigo, os eletricitas passam a trabalhar no cabeamento de alimentação do quadro de comando dos Heliotrópicos. Este cabeamento se inicia em um quadro de baixa tensão que é alimentado diretamente por um dos postos de transformação do instituto de ensino. Este mesmo circuito será responsável por transportar a energia produzida pelos Geradores

Heliotrópicos para as cargas da faculdade. Para isto, são utilizados cabos de 50mm² em um circuito trifásico com neutro e condutor de aterramento sendo de 25mm². A figura 43 mostra o quadro geral de baixa tensão que alimenta o quadro de comando dos Geradores Heliotrópicos.

Figura 43 - Quadro geral de baixa tensão.



Fonte: O próprio autor.

Com os módulos FV instalados e fixados na grade pode-se iniciar o processo de ligação entre os mesmos para a formulação das *strings* da mesma maneira como foram projetados. Aqui, o próprio autor do projeto e deste trabalho foi o responsável por realizar tais conexões e aferir as tensões de cada *string*, montada para fazer a verificações se estas tensões estavam de acordo com as tensões esperadas. A figura 44 mostra os vinte e seis módulos FV de um gerador fixados em uma grade.

Figura 44 - Módulos FV fixados na grade.



Fonte: O próprio autor.

Estando todos os módulos FV devidamente fixados na grade e com suas conexões em *string* feitas, os montadores partem para a conclusão da montagem da última parte do Gerador Heliotrópico, que é justamente fazer a colocação e fixação da grade em cima do “helicóptero”.

Neste procedimento se faz necessário o uso de um caminhão “munck”, responsável por suspender a grade com os módulos FV do gerador. Com o auxílio do chefe de montagem dos geradores, o operador do caminhão suspende e leva a grade até o topo do tronco, onde já se encontram dois montadores que farão a fixação da grade no “helicóptero” enquanto o mesmo está suspenso.

Fixadas as 7 (sete) grades, as equipes de eletricitas e auxiliares sobem no gerador para realizar a conexão dos cabos de corrente contínua que se conectam aos cabos dos módulos FV pendentes.

Antes de qualquer conexão, estes cabos recebem conectores do tipo MC4, similares aos já presentes nos cabos dos módulos FV. Estes conectores são utilizados para dar maior segurança nas conexões e também para os operadores porque não contém partes metálicas energizadas, além de realizar de maneira fácil as conexões.

Estando feitas as conexões dos cabos de corrente contínua, um eletricista vai até o abrigo e, com um multímetro, verifica as tensões de cada uma das nove *strings* montadas para averiguar se as mesmas estão de acordo com o esperado. Neste procedimento, percebeu-se que as *strings* estavam com tensões na faixa entre 769 à 775V. Como cada uma destas *strings* possui 19 módulos em série, esperava-se então que ao verificar a tensão de um módulo FV isolado no multímetro, o mesmo indicasse uma tensão próxima a 1/19 das tensões de *strings* medidas, isto é, uma tensão próxima a 40V, e foi exatamente esta a tensão encontrada na verificação. A figura 45 mostra a leitura da tensão de uma *string* completa em circuito aberto.

Figura 45 - Medição da tensão de *string* utilizando multímetro.



Fonte: O próprio autor.

Visto que os módulos FV já estavam em seu devido lugar, os cabos CC conectados, e o inversor solar fixado na parede do abrigo, decidiu-se por realizar as conexões destas *strings* nas entradas do inversor. Como neste momento ainda não haviam sido feitas as conexões dos cabos de corrente alternada, não foi possível colocar o mesmo em funcionamento.

O passo seguinte da instalação foi colocar o quadro de comando para acionamento dos geradores em seu lugar reservado dentro do abrigo. Como o quadro possui um peso considerável, foram necessários 5 homens para fazer a colocação do mesmo dentro do abrigo. A figura 46 mostra o quadro elétrico de comando dos Geradores Heliotrópicos.

Figura 46 - Quadro elétrico de comando.



Fonte: O próprio autor.

Com o quadro instalado, o electricista inicia o trabalho de conexões dos circuitos em corrente alternada destinados a alimentação das cargas instaladas nos geradores, isto é, circuitos de iluminação, circuitos dos motores elétricos e circuitos das chaves fim de curso. Os quadros de comando chegam completamente preparados, esperando apenas pelos cabos destes circuitos, além é claro, do circuito de alimentação geral do quadro de comando.

Após a conexão de todos estes cabos, falta apenas a conexão dos cabos de corrente alternada do inversor solar. Estes cabos saem do inversor solar e são conectados em um disjuntor de caixa moldada presente no quadro de comando dos Geradores Heliotrópicos.

Feita esta última conexão elétrica, estava tudo preparado para colocar os Geradores Heliotrópicos em operação, isto é, iniciar a geração de energia a partir dos módulos FV e iniciar os movimentos de seguimento solar.

Mas antes, os montadores e técnicos fizeram uma revisão geral em toda a instalação. Foram feitas verificações nos acoplamentos dos motores, ligações elétricas dos motores, revisadas conexões no quadro de comando, reaperto de conexões e etc.

Os testes foram realizados na presença de engenheiros, técnicos, montadores e electricistas. Na bateria de testes foi monitorado o desenvolver da movimentação do gerador tanto no eixo Leste-Oeste quanto no eixo norte-sul e as correntes dos motores. Foi observado que ao realizar os testes em toda a extensão dos dois movimentos não houve nenhum tipo de travamento, aceleração demasiada ou algo desse tipo. A figura 47 mostra os técnicos e montadores realizando testes em um dos geradores.

Figura 47 - Teste de Gerador Heliotrópico.



Fonte: O próprio autor.

As correntes elétricas, ao longo de toda a extensão dos movimentos, se mostraram sempre abaixo dos valores nominais dos motores. Houve uma pequena ultrapassagem do valor nominal de 13% no movimento Leste-Oeste. Isto ocorreu quando o gerador se encontrava com os módulos FV inclinados na posição máxima no sentido oeste e o acionamos para que o mesmo se dirigisse para o leste.

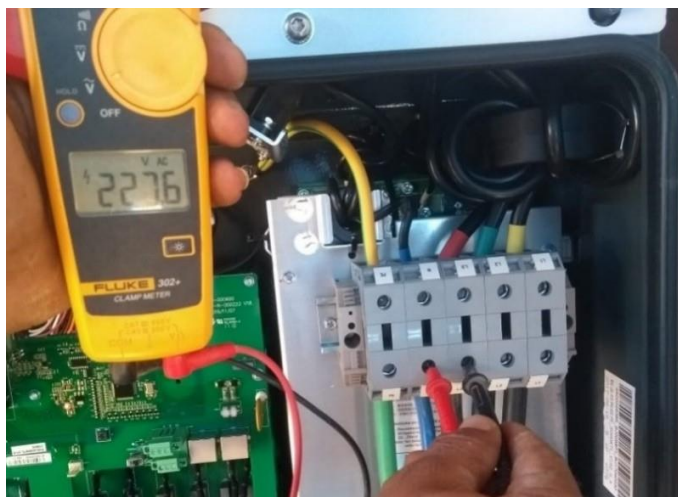
O inversor solar foi colocado em funcionamento. As correntes e tensões das *strings* se mostraram em um nível adequado, bem próximos aos valores nominais. As tensões de saída do inversor estavam compatíveis com as tensões de rede, o que já era de se esperar, por conta da função de sincronismo que o inversor possui. Depois de algum tempo funcionando, observou-se que a temperatura de trabalho do inversor atingiu 55° C e se manteve nesta até o fim das observações. A figura 48 mostra a verificação com um multímetro da tensão de linha e a figura 49 mostra a verificação da tensão de fase na saída do inversor solar.

Figura 48 - Tensão de linha na saída do inversor solar.



Fonte: O próprio autor.

Figura 49 - Tensão de fase na saída do inversor solar.



Fonte: O próprio autor.

E por fim, no início da noite, após os testes relacionados aos movimentos do Gerador Heliotrópico, foram realizados os testes de acionamentos dos refletores de iluminação principais e decorativos. Neste quesito não houve nenhum problema. As figuras 50 à 53 mostram a iluminação dos geradores.

Figura 50 - Teste de iluminação indireta dos geradores.



Fonte: O próprio autor.

Figura 51 - Teste de iluminação decorativa dos geradores.



Fonte: O próprio autor.

Figura 52 - Teste de iluminação dos geradores.



Fonte: O próprio autor.

Figura 53 - Detalhe de iluminação de um gerador individual.



Fonte: O próprio autor.

Olhando o datasheet do inversor, viu-se que o mesmo indica uma faixa de temperatura para operação que vai de -25°C até 60°C . Os engenheiros propuseram a instalação de exaustores nos abrigos para conter um pouco mais esta temperatura de operação.

Todas estas atividades se desenrolaram do fim do mês de novembro, passando pelo mês de dezembro, sendo concluídas pouco antes do período de festas no fim do ano de 2018. Após a aprovação dos testes por parte dos engenheiros e técnicos, os Geradores Heliotrópicos iniciaram a operação e geração de energia elétrica no fim deste mesmo mês e permanecem em funcionamento até os dias de hoje, sem haver problema algum.

5.3 Problemática dos cabos elétricos.

A maior das dificuldades enfrentadas em relação a estas instalações se deu na questão dos cabos elétricos. No caso dos cabos de corrente contínua, o problema foi a dificuldade em executar o que o projeto necessitava; nos cabos de corrente alternada o problema foi a quantidade de cabos elevada em determinados trechos.

5.3.1 Condutores CC

Como já explicado, os 7 geradores Heliotrópicos possuem no total 171 módulos FV designados para produção de energia elétrica conectada à rede elétrica e, por conta das características do inversor solar designado para esta planta, para fazer uma conexão de circuito CC válida é necessário que a *string* tenha uma tensão mínima de 520 V e no máximo 1000 V.

Observando os 26 módulos instalados no gerador heliotrópico era de se esperar que uma *string* começasse e terminasse no mesmo gerador, isto é, que uma combinação feita com os 26 módulos fosse capaz de entregar um número de *strings* fechadas com o intuito de facilitar a instalação das *strings* no inversor solar. Porém, foi encontrado um problema nessa questão e não foi possível praticar este método.

Dada a tensão nominal de cada módulo de 37,2 V, não é possível conectar os 26 módulos em série para formar uma única *string* por gerador heliotrópicos, a tensão de circuito aberto desta configuração seria de 1185,6 V, tensão esta que está acima da permitida na entrada CC do inversor solar.

Pensou-se também em montar duas *strings* iguais com 13 módulos, o problema aí é que com 13 módulos conectados em série a tensão nominal final da configuração é de 483,6 V, que se encontra abaixo da tensão mínima exigida na entrada do inversor solar de 520 V.

Dado tal situação, decidiu-se montar *strings* com 19 módulos em série. Considerando os dados contidos no datasheet do módulo FV utilizado na instalação, tem-se que a tensão nominal desta *string* é de 706,8V enquanto a corrente nominal é de 8,9A.

Porém, o aspecto mais interessante da questão da formulação de *strings* é a dificuldade encontrada no momento de realizar a instalação elétrica destes circuitos. Como cada gerador possui 26 módulos instalados e as *strings* montadas são de 19 módulos em série, fica claro que, para algumas *strings*, não é possível iniciar e concluir uma *string* em um determinado gerador.

Por exemplo, em um determinado Gerador Heliotrópico com 26 módulos, é possível iniciar e concluir uma *string* formada por 19 módulos, porém, neste mesmo gerador 7 módulos estarão sobrando e precisarão ser conectados em 12 outros módulos que estão instalados em outro Gerador Heliotrópico.

À primeira vista esta característica pode aparentar não ser um grande problema a ser resolvido, mas a grande dificuldade está na altura em que se encontram os módulos

FV instalados no gerador e no modo de instalação dos condutores elétricos de toda a planta, que foi uma decisão tomada em conjunto pelos responsáveis pela instalação, por projetistas e também pelo engenheiro de manutenção do cliente.

Para as *strings* em que isto acontece foi decidido o seguinte modo de instalação: os módulos que estão instalados no gerador em que se inicia a *string* são conectados em série, bem como os módulos pertencentes a esta mesma *string* que estão instalados no gerador seguinte. Após as ligações elétricas entre os módulos, restam os condutores positivo, no primeiro módulo da *string*, e negativo, no último módulo da *string* de cada um dos geradores.

O condutor positivo do início da *string* já pode, e deve, ser levado até o inversor solar. O condutor negativo da primeira parte da *string* deve ser levado até o primeiro módulo que irá continuar aquela *string* no gerador Heliotrópico seguinte e conectado no polo positivo deste módulo. O condutor negativo encontrado ao fim de toda a *string* é levado até o inversor solar. As figuras 54 à 60 indicam a identificação de cada módulo instalados nos Geradores Heliotrópicos, indicando a *string* à qual o mesmo pertence (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9), bem como a identificação do mesmo dentro da *string* (1 à 19). Os módulos identificados com a letra “B” são os módulos reservados para a aplicação off-grid da planta (figura 57).

Toda esta complexidade para a formulação e instalação das *strings* desta planta é oriunda da problemática descrita no início deste tópico, mais especificamente das tensões mínimas e máximas do inversor solar utilizado. Salienta-se aqui que a seleção e compra destes inversores é anterior à chegada do projetista de instalações elétricas, portanto, para a confecção do projeto o projetista já tinha como um parâmetro a se considerar o inversor adquirido por parte do cliente. Em novas instalações que venham a ser feitas com o Gerador Heliotrópico, pode-se contornar esta problemática com um devido estudo e seleção de inversor solar.

Observação: os cabos destinados para os circuitos de corrente contínua desta instalação possuem seção de 6mm², com isolamento em PVC, suportando tensões de até 1500V.

Figura 54 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 1

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| C1 | C1 | C1 | C2 | C1 | C2 | C1 | C1 | C1 |
| 6 | 7 | 9 | 1 | 10 | 7 | 11 | 12 | 13 |
| C1 | C1 | C2 | C1 | | C1 | C2 | C1 | C1 |
| 5 | 8 | 2 | 1 | | 19 | 6 | 14 | 15 |
| C1 | C1 | C1 | C2 | C2 | C2 | C1 | C1 | C1 |
| 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 18 | 17 | 16 |

Fonte: O próprio autor.

Figura 55 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 2

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| C2 | C2 | C2 | C2 | C3 | C3 | C3 | C3 | C3 |
| 11 | 10 | 9 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C2 | C2 | C2 | C2 | | C3 | C3 | C3 | C3 |
| 12 | 15 | 16 | 19 | | 14 | 10 | 9 | 6 |
| C2 | C2 | C2 | C2 | C3 | C3 | C3 | C3 | C3 |
| 13 | 14 | 17 | 18 | 13 | 12 | 11 | 8 | 7 |

Fonte: O próprio autor.

Figura 56 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 3

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| C4 | C4 | C4 | C5 | C4 | C5 | C4 | C4 | C4 |
| 7 | 8 | 9 | 1 | 10 | 2 | 11 | 12 | 13 |
| C4 | C4 | C3 | C4 | | C4 | C3 | C4 | C4 |
| 5 | 6 | 15 | 1 | | 19 | 19 | 14 | 15 |
| C4 | C4 | C4 | C3 | C3 | C3 | C4 | C4 | C4 |
| 4 | 3 | 2 | 16 | 17 | 18 | 18 | 17 | 16 |

Fonte: O próprio autor.

Figura 57 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 4

| | | | | | | | | |
|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| B | B | B | C5 | C5 | C5 | C5 | C5 | C5 |
| | | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| B | B | B | B | | C5 | C5 | C5 | C5 |
| | | | | | 17 | 13 | 12 | 9 |
| B | B | B | B | C5 | C5 | C5 | C5 | C5 |
| | | | | 16 | 15 | 14 | 11 | 10 |

Fonte: O próprio autor.

Figura 58 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 5

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| C6 | C6 | C6 | C5 | C6 | C5 | C6 | C6 | C6 |
| 7 | 8 | 9 | 18 | 10 | 19 | 11 | 12 | 13 |
| C6 | C6 | C7 | C6 | | C6 | C7 | C6 | C6 |
| 5 | 6 | 15 | 1 | | 19 | 19 | 14 | 15 |
| C6 | C6 | C6 | C7 | C7 | C7 | C6 | C6 | C6 |
| 4 | 3 | 2 | 16 | 17 | 18 | 18 | 17 | 16 |

Fonte: O próprio autor.

Figura 59 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 6

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| C8 | C8 | C8 | C8 | C7 | C7 | C7 | C7 | C7 |
| 11 | 10 | 9 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C8 | C8 | C8 | C8 | | C7 | C7 | C7 | C7 |
| 12 | 15 | 16 | 19 | | 14 | 10 | 9 | 6 |
| C8 | C8 | C8 | C8 | C7 | C7 | C7 | C7 | C7 |
| 13 | 14 | 17 | 18 | 13 | 12 | 11 | 8 | 7 |

Fonte: O próprio autor.

Figura 60 - Esquema de módulos e *strings* no Gerador Heliotrópico 7

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| C9 | C9 | C9 | C8 | C9 | C8 | C9 | C9 | C9 |
| 6 | 7 | 9 | 1 | 10 | 7 | 11 | 13 | 14 |
| C9 | C9 | C8 | C9 | | C9 | C8 | C9 | C9 |
| | 8 | 2 | 1 | | 19 | 6 | 12 | 15 |
| C9 | C9 | C9 | C8 | C8 | C8 | C9 | C9 | C9 |
| 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 18 | 17 | 16 |

Fonte: O próprio autor.

5.3.2 Condutores CA

Os Geradores Heliotrópicos são seguidores solares de dois eixos e, para efetuar os movimentos de seguimento solar, cada gerador é munido de dois motores elétricos de indução trifásicos: Um para o movimento no eixo Norte-Sul e outro para o movimento no eixo Leste-Oeste.

Em cada gerador são instaladas 4 (quatro) chaves fins de curso, 1 (uma) chave em cada extremidade do movimento norte-sul e uma chave em cada extremidade do movimento Leste-Oeste. Estas chaves são usadas como medidas de segurança que tem como objetivo evitar que os movimentos do seguidor se prolonguem até exceder o limite de suas posições mais extremas, o que poderia vir a causar danos, destruição, e até mesmo grandes acidentes envolvendo transeuntes que estejam a circular próximo ao gerador.

Como citado anteriormente, aproveitando a altura em que são instalados os módulos FV, os Geradores Heliotrópicos são utilizados como postes de iluminação para a área em que estão localizados. Na mesma estrutura metálica onde são fixados os módulos FV do gerador, são fixados 2 (dois) refletores de luz branca com 200W de potência cada. São acrescentados ainda 4 (quatro) refletores com iluminação na cor verde e de 10W de potência são fixados no tronco do gerador e servem para oferecer um toque decorativo aos geradores.

Os circuitos em corrente alternada, utilizados para fornecer energia elétrica para estes equipamentos instalados, tem sua origem no quadro elétrico de comando dos geradores. Os circuitos são divididos da seguinte maneira:

- 1 (um) circuito trifásico, 380V, para o motor do movimento Norte-Sul;
- 1 (um) circuito trifásico, 380V para o motor do movimento Leste-Oeste;
- 1 (um) circuito monofásico, 220V, para alimentação dos refletores de iluminação;
- 2 (dois) circuitos monofásicos, 220V, para chaves fins de curso.

Cada Gerador Heliotrópico deve receber cada um destes circuitos e a origem de todos estes circuitos é o mesmo, assim, por conta de se utilizar cabos monopolares, um número grande de condutores saem do abrigo no qual estes cabos são conectados no quadro elétrico de comando e segue para cada gerador.

Em um dia em que houver uma manutenção no quadro elétrico ou no abrigo, se houver um rompimento de algum destes condutores, ou até mesmo surgir a necessidade de se instalar algum novo circuito em meio a estes cabos, a dificuldade encontrada será enorme.

Para futuras instalações, é importante fazer um estudo que analise a possibilidade de se utilizar cabos multipolares em cada um dos circuitos necessários na instalação, apesar destes serem mais caros no mercado, podem acabar acelerando o processo de instalação e evitando alguns problemas durante manutenções.

Uma observação: todos os condutores em corrente alternada desta instalação possuem seção de 2,5mm² com isolamento em PVC e tensão de isolamento até 750V. Estes condutores seguem devidamente o padrão de cores descritos na NBR 5410/2004 – Instalações Elétricas em Baixa Tensão.

6. COLETA DE DADOS E DISCUSSÕES

A coleta de dados que serão mostrados a seguir foi realizada pelo autor deste trabalho no dia 05 de maio de 2019 com o auxílio de um servidor do instituto de ensino que estava realizando uma visita às obras que continuam a se desenvolver (junho de 2019) para a conclusão das instalações dos 63 Geradores Solar Heliotrópicos contratados pelo Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, em seu campus lagoa.

Estes dados foram retirados diretamente do histórico de geração de energia presente nos inversores, tanto da planta fixa, quanto da planta de seguidor solar. Em seus bancos de dados os inversores guardam as informações de energia elétrica gerada em cada um dos meses do ano, a energia gerada em cada ano, e toda energia gerada desde o momento em que se inicializou o inversor. Estes inversores utilizados são capazes ainda de mostrar, em tempo real, a energia gerada ao longo do dia.

Para que se pudesse desenvolver as análises de desempenho das plantas fixas e heliotrópicos, decidiu-se por coletar as gerações de energia elétrica dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril completos.

6.1 Dados coletados

A Tabela 11 mostra as gerações de energia elétrica dos meses citados:

Tabela 11 - Geração de energia elétrica mensal em kWh (2019).

| Mês | Geração da planta Fixa (kWh) | Geração dos Geradores Heliotrópicos (kWh) |
|-----------|---------------------------------|--|
| Janeiro | 26.478 | 9.862 |
| Fevereiro | 25.713 | 10.020 |
| Março | 25.652 | 8.640 |
| Abril | 23.370 | 8.809 |

Fonte: o próprio autor

Ao observar os dados contidos na Tabela 11 e constatar as grandes diferenças entre as produções, deve-se lembrar que as potências da planta fixa e dos Geradores Heliotrópicos são diferentes. A planta fixa considerada tem potência de 208,08 kWp enquanto a planta dos Geradores Heliotrópicos tem potência de 56,43 kWp.

6.2 Produtividade

A potência instalada da planta fixa é 3,69 maior do que a potência instalada da planta dos Geradores Heliotrópicos e, mesmo assim, a produtividade dos Heliotrópicos é superior ao da planta fixa.

A tabela 12 mostra as produtividades em quilowatt-hora (kWh) gerados por quilowatt-pico (kWp) instalados em cada tipo de planta. Também é mostrado o ganho de produtividade, em porcentagem, que os Geradores Heliotrópicos possuem em relação à planta fixa para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2019.

Tabela 12 - Produtividade mensal em kWh/kWp (2019).

| Mês | Produtividade da planta Fixa (kWh/kWp) | Produtividade dos Geradores Heliotrópicos (kWh/kWp) | Ganho de produtividade dos Geradores Heliotrópicos em relação à planta fixa |
|-----------|--|---|---|
| Janeiro | 127,25 | 174,77 | 37,34% |
| Fevereiro | 123,59 | 177,57 | 43,68% |
| Março | 123,28 | 153,11 | 24,19% |
| Abril | 112,31 | 156,10 | 38,99% |

Fonte: o próprio autor

A produtividade final de uma planta FV é a razão da energia elétrica injetada na rede elétrica E_{GRID} pela potência nominal da planta P_0 , representando o número de horas que a planta precisaria funcionar na potência nominal para fornecer uma quantidade E_{GRID} de energia para a rede. A produtividade pode ser dada em horas ou em kWh/kWp. Como este parâmetro é normalizado pela potência da planta, o mesmo pode ser utilizado para comparar plantas de diferentes tamanhos (MARION et al., 2005).

No período analisado percebe-se que no mês de março, mês em que os Geradores Heliotrópicos só geraram 91,08% da energia elétrica esperada para o mês, a produtividade da mesma foi superior a produtividade da planta fixa em 24,19%. Nos meses de janeiro e abril, o ganho de produtividade ficou pouco abaixo de 40%, com 37,34% e 38,99% respectivamente.

No mês de fevereiro a planta atingiu um ganho de produtividade de 43,68%, o que significa um ganho mais do que satisfatório. Uma observação que pode ser feita aqui é

que fevereiro também foi o mês em que se houve a maior geração de energia elétrica do período analisado, mesmo sendo o mês que possui menos dias.

A média dos ganhos de produtividade para o período analisado dos Geradores Heliotrópicos em relação à planta fixa é de 36,05%. Este valor médio de ganho pode ser considerado um dado com alto grau de importância, pois com ele é possível fazer levantamentos de potências para novas plantas que sejam localizados em regiões próximas de Juazeiro do Norte e do Cariri.

Este resultado está bem próximo dos resultados de MIRZAEI; MOHIABADI. (2017). Os autores estudaram plantas FV com seguimento solar numa região semiárida do Irã, semelhante à região do Cariri relatada neste trabalho. Lá os rastreadores solares atingiram ganhos na geração de energia de 30% em dias ensolarados quando comparados a plantas fixas.

6.3 Fator de Capacidade

Segundo PIKANÇO; ROLIM; PONTE. (2018), o fator de capacidade (FC) é utilizado como uma análise de desempenho de uma planta FV. O FC é a proporção entre a produção efetiva de uma usina em um período de tempo e a produção nominal neste mesmo período. Para os cálculos do FC, foram considerados o número total de horas e o total de energia gerado no respectivo mês. A Tabela 13 mostra os FC calculados:

Tabela 13 - Fator de capacidade mensal das plantas (2019).

| Mês | FC da planta Fixa | FC dos Geradores Heliotrópicos |
|-----------|-------------------|--------------------------------|
| Janeiro | 17,10% | 23,49% |
| Fevereiro | 18,39% | 26,42% |
| Março | 16,57% | 20,58% |
| Abril | 15,60% | 21,68% |

Fonte: o próprio autor

O fator de capacidade para todo o período analisado das plantas FV analisados é calculado a partir da expressão:

$$FC_{SF} = \frac{E_P}{P_0 * \Delta t}$$

Onde:

E_p = energia elétrica gerada no período de tempo Δt , em kWh;

P_0 = potência instalada nominal da planta FV

Δt = número de dias do período analisado;

A seguir tem-se o cálculo do Fator de Capacidade para as duas plantas ao longo dos 4 meses analisados (120 dias).

FC da planta fixa:

$$FC_{SF} = \frac{101.213}{208,08 * 120 * 24} = 16,89\%$$

FC dos Heliotrópicos:

$$FC_{SF} = \frac{37.331}{56,43 * 120 * 24} = 22,97\%$$

A diferença de 6,08% entre os FC das plantas, também confirma o dado de ganho de produtividade dos Geradores Heliotrópicos em relação à planta fixa de 36%.

6.4 Plantas reais X simulações

Podem-se fazer também algumas análises a respeito das simulações feitas, em um primeiro momento, neste trabalho, frente aos dados de geração coletados in loco.

A análise é feita nos próximos itens em duas partes, a primeira confronta a simulação feita para a planta fixa com os dados obtidos em campo para o mesmo planta. A segunda é semelhante a primeira, porém esta é feita considerando a planta de seguimento solar do *software* Solergo e os Geradores Heliotrópicos.

6.4.1 Planta Fixa

A Tabela 14 se vale dos dados mostrados nas tabelas 7 e 11 e indica as gerações de energia da planta fixa esperadas pelas simulações, via Solergo, e a geração que efetivamente aconteceu na instalação.

Tabela 14 - Geração de energia elétrica mensal em kWh para planta de 208,08 kWp com ângulo fixo (2019).

| Mês | Geração esperada (kWh) | Produtividade esperada (kWh/kWp) | Geração real (kWh) | Produtividade real (kWh/kWp) | Desvio (%) |
|-----------|------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------------|------------|
| Janeiro | 28538,89 | 137,15 | 26478 | 127,25 | 7,78 |
| Fevereiro | 25876,78 | 124,36 | 25713 | 123,57 | 0,64 |
| Março | 28849,88 | 138,65 | 25652 | 123,28 | 12,47 |
| Abril | 26917,14 | 129,36 | 23.370 | 112,31 | 15,18 |

Fonte: o próprio autor

Ao observar a tabela 14 vê-se que a geração de energia elétrica esperada para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril está sempre acima da geração real que se apresentou na instalação. A explicação para isto é o fato de a simulação ter sido realizada considerando a planta com a melhor disposição possível para os módulos FV, enquanto que, na instalação real, a disposição dos módulos é variada. Esta variação acontece principalmente pelo fato de que os módulos foram instalados nas lajes de algumas edificações do instituto de ensino, estas edificações possuem orientações variadas, e os instaladores não tiveram a preocupação em realizar possíveis correções de orientação para os módulos.

6.4.2 Geradores Heliotrópicos

A Tabela 15 se vale dos dados mostrados nas tabelas 9 e 11 e indica as gerações de energia dos Geradores Heliotrópicos esperadas pelas simulações, via Solergo, e a geração que efetivamente aconteceu na instalação.

Tabela 15 - Geração de energia elétrica mensal em kWh para planta de seguidor solar (2019).

| Mês | Geração esperada (kWh) | Produtividade esperada (kWh/kWp) | Geração real (kWh) | Produtividade real (kWh/kWp) | Desvio (%) |
|-----------|------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------------|------------|
| Janeiro | 9869 | 174,89 | 9862 | 174,77 | 0,07 |
| Fevereiro | 8570 | 151,87 | 10020 | 177,57 | -14,47 |
| Março | 9486 | 168,10 | 8640 | 153,11 | 9,79 |
| Abril | 8937 | 158,37 | 8.809 | 156,10 | 1,45 |

Fonte: o próprio autor

Na tabela 15 vê-se que no mês de janeiro os Geradores Heliotrópicos geraram, praticamente, a mesma energia elétrica que se esperava gerar com uma planta com seguidores de dois eixos na simulação com o Solergo. No mês de fevereiro a geração de energia elétrica da instalação foi consideravelmente superior a geração esperada a partir da simulação. São 1.450 kWh gerados a mais do que o esperado, o que corresponde a um ganho de 16,92%.

Porém, nos meses de março e abril a geração de energia elétrica ficou abaixo do esperado. No mês de março a geração real só foi capaz de atingir 91,08% da geração energética esperada para o mês. Em abril, a diferença entre a geração esperada e a geração que se concretizou foi menor e o índice de energia gerada em relação a geração esperada foi de 98,57%.

Considerando todo o período de 4 meses, há um ganho de energia elétrica da planta instalada em cima da planta simulada. A planta instalada com Geradores Heliotrópicos foi capaz de gerar 37.331 kWh, esta energia é 1,27% maior do que a energia elétrica esperada para o período, que é de 36.862 kWh. Este resultado é compatível com o estudo de EKE; SENTURK. (2018), os autores mostraram que a diferença entre a geração real e a geração esperada das plantas foi menor que 5%.

Por fim, a Tabela 16 mostra os dados do Calendário de Chuvas no Estado do Ceará, retirados do site da FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). Estes dados tem como intuito informar o leitor do nível de precipitações na cidade de Juazeiro do Norte nos meses analisados para que o mesmo possa fazer

associação destes dados com os dados contidos nas tabelas 14 e 15 e se situar melhor no panorama deste estudo.

Tabela 16 - Chuvas em Juazeiro do Norte no período analisado.

| Mês | Normal (mm) | Observado (mm) | Desvio (%) |
|-----------|----------------|-------------------|---------------|
| Janeiro | 155,0 | 89,3 | -42,4 |
| Fevereiro | 186,1 | 84,9 | -54,4 |
| Março | 235,9 | 240,9 | 2,1 |
| Abril | 181,5 | 157,9 | -13,0 |

Fonte: o próprio autor

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo acerca de duas plantas FV conectadas à rede elétrica do Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, campus Lagoa Seca, em Juazeiro do Norte – Ceará, situada em zona urbana. Uma planta FV que está em operações desde 2016 utilizando módulos FV em com angulação fixa e uma planta FV equipada de sete seguidores solares de dois eixos comerciais. Na literatura revisada no capítulo de Estado da Arte são mostrados alguns estudos envolvendo seguidores solares de um e dois eixos em diversas localidades no Brasil e no mundo, inclusive em localidades com condições climáticas semelhantes às plantas estudadas neste trabalho, o que possibilita algumas comparações. O grande diferencial deste trabalho está no capítulo 5, Instalação da Planta FV com seguidores, que descreve e mostra em fotografias em um alto nível de detalhamento as atividades práticas que se desenrolaram durante todo o período em que o sistema estava sendo instalado, este capítulo traz ainda as uma discussão sobre dificuldades encontradas durante estas atividades e as soluções encontradas para contornar tais dificuldades.

Os dados de geração de energia elétrica das duas plantas foram coletados pelo autor diretamente dos displays dos inversores solares utilizados. Estes dados são mostrados no capítulo 6, Coleta de Dados e Discussões, além disso, estes dados são utilizados em uma análise de desempenho dos dois tipos de instalação, com cálculos de produtividade e fator de capacidade.

Como resultados, obteve-se um ganho médio de 36,05% de produtividade da planta de seguidor solar em relação à planta fixa para todo o período analisado, do dia 1º de janeiro até o dia 30 de abril do ano de 2019. Considerando os 4 meses analisados, o mês em que houve o menor ganho de produtividade foi o mês de março, quando o ganho foi de 24,19%, no mês de fevereiro ocorreu o maior ganho, 43,68%. O FC da planta fixa para todo o período analisado foi de 16,89% enquanto que o FC dos seguidores solares foi de 22,97%. Estas informações são relevantes, pois podem ser utilizadas como metas a serem atingidas ou ainda podem ser consideradas para realizar dimensionamentos de sistemas de outras plantas com seguimento solar na região Sul do Ceará, contribuindo assim para o desenvolvimento da geração FV com rastreamento solar.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos aspectos discutidos neste trabalho, bem como no surgimento de ideias paralelas ao mesmo, pode-se listar os seguintes tópicos como sugestões para trabalhos futuros:

1 – Realizar um estudo a respeito da viabilidade financeira da implantação de Geradores Heliotrópicos: Assim pode-se fazer uma comparação entre o Gerador Solar Heliotrópico e uma planta fixa convencional também no aspecto financeiro.

2 – Elaborar um plano de manutenção para os Geradores Heliotrópicos, visando uma atenção especial principalmente nas plantas de acionamentos, limpeza de módulos FV, além do comportamento do inversor solar e do quadro elétrico de comando.

3 – Estudar possíveis adaptações para implantação de um Gerador Solar Heliotrópico em lajes e telhados de edificações.

4 – Análise de desempenho de Geradores Heliotrópicos instalados em diferentes latitudes.

5 – Comparação de desempenhos entre o Gerador Heliotrópico e outros tipos de rastreadores solares de 2 eixos com latitudes aproximadas.

6 – Aplicação de Gerador Solar Heliotrópico em instalações feitas na modalidade off-grid.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Infográfico Absolar. 2019. Disponível em: <<http://absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: 06/06/2019.

BARBOSA, D. A.; CARVALHO, P. C. M.; RAMALHO, G. L. B.; MOREIRA, A. P.; NETO, M. R. B.; MENEZES, R. J. A. Avaliação do desempenho de um seguidor solar monoaxial para sistemas fotovoltaicos isolados. CBENS 2016 - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, MG - Brasil, 2016.

EKE, R.; SENTURK, A. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. **Solar Energy**, v. 86, p. 2665-2672, 2012. ISSN 0038-092X.

FROSI, F.; CHESINI, D.; GABE, I. J.; BONA, J. C. Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de Farroupilha - RS. CBENS 2018 – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018, 2018.

FUNCEME. Calendário das chuvas no Estado do Ceará. 2019. Disponível em: <<http://www.funceme.br/app/calendario/produto/municipios/media/mensal>>. Acesso em: 23/06/2019.

GIL, F. J. G.; WANG, X.; BARNETT, A. Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 306-313, 2012. ISSN 1364-0321.

GOOGLE. Google Maps. 2019. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Unile%C3%A3o+-+Centro+Universit%C3%A1rio+Le%C3%A3o+Sampaio/@-7.23715,-39.3290846,8812m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7a17873e8d7b7f1:0x924dfa3046e42b89!8m2!3d-7.2533898!4d-39.315533>>. Acesso em: 06/06/2019.

GOOGLE. Google Maps. 2019. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Unile%C3%A3o+->

+Centro+Universit%C3%A1rio+Le%C3%A3o+Sampaio/@-7.2540287,-
39.3152057,384m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7a17873e8d7b7f1:0x924dfa3046e42b
89!8m2!3d-7.2533898!4d-39.315533>. Acesso em: 06/06/2019.

LIMA, L. C. A.; SARRADE, L. Como otimizar a produção e a eficiência de usinas fotovoltaicas com o uso de rastreadores solares. CBENS 2016 -VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, MG - Brasil, 2016.

MARION, B.; ADELSTEIN, J.; BOYLE, K.; HAYDEN, H.; HAMMOND, B.; FLETCHER, T.; CANADA, B.; NARANG, D.; KIMBER, A.; MITCHELL, L.; RICH, G.; TOWNSEND, T. Performance parameters for grid-connected PV systems. Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005., 2005. IEEE.p.1601-1606.

MIRZAEI, M.; MOHIABADI, M. Z. Comparative analysis of energy yield of different tracking modes of PV systems in semiarid climate conditions: The case of Iran. **Renewable Energy**, v. 119, p. 400-409, 2018. ISSN 0960-1481.

NASCIMENTO, L. R.; VIEIRA, C. L. C. S.; VERÍSSIMO, P. H. A.; PIRES, A. M.; RÜTHER, R. Geração solar fotovoltaica com sistema de rastreamento de dois eixos no município de Jaguari - RS. CBENS 2018 – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018, 2018.

ORTIZ, F. H. V.; ALVES, V. C. G.; HOLDEFER, A. E.; MEDEIROS, A. M. M. Desenvolvimento de sistema automático de rastreamento solar para painéis fotovoltaicos. CBENS 2018 – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018, 2018.

PICANÇO, J.; ROLIM, J.; PONTE, I. Panorama mundial e brasileiro das energias renováveis. CINASE. Fortaleza-CE 2018.

ROCHA FILHO, J. I. C. Sistema de seguimento solar de um eixo com diferentes estratégias de seguimento para módulos fotovoltaicos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, UFC.

SEMPINAR, A.; CEBECI, M. Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PV arrays. **Applied Energy**, v. 92, p. 677-685, 2012. ISSN 0306-2619.

SHAYANI, R. A. Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Utilizando Módulos de 32 Células. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, UNB.

SOLAR, P. Seguidor solar – Tracker: vantagens e desvantagens parte 1. 2016. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar--tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>>. Acesso em: 06/06/2019.