



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

TOMÁS DAHAS JORGE MUNIZ

**ESTUDO DE CASO: USO DE RASTREADORES SOLARES COMO
OTIMIZADORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE PORTE PARA O
ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2017

TOMÁS DAHAS JORGE MUNIZ

ESTUDO DE CASO: USO DE RASTRADORES SOLARES COMO OTIMIZADORES DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE PORTE PARA O ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

FORTALEZA

2017

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)

M936e Muniz, Tomás Dahas Jorge Muniz.
Estudo de Caso: Uso de Rastreadores Solares como Otimizadores de Sistemas Fotovoltaicos de Grande Porte para o Estado do Ceará / Tomás Dahas Jorge Muniz Muniz. – 2017.
72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

1. Energia Solar. 2. Sistemas Fotovoltaicos. 3. Sistemas de Rastreamento Solar. I. Título.

CDD 621.042

TOMÁS DAHAS JORGE MUNIZ

ESTUDO DE CASO: USO DE RASTRADORES SOLARES COMO OTIMIZADORES DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE PORTE PARA O ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energia
Renováveis do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do Título
de Engenheiro de Energias Renováveis.

Aprovada em: 20/07/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Estêvão Rolim Fernandes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Msc. Paulo Herbert França Maia Jr.
Faculdade Maurício de Nassau (UNINASSAU)

Dedico este trabalho aos meus pais, Nelma
Maria Moraes Dahas Jorge e Adão Linhares
Muniz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que iluminou meu caminho durante essa caminhada.

Aos meus pais, Nelma Maria Moraes Dahas Jorge e Adão Linhares Muniz, por todo o carinho, incentivo e apoio, que foi fundamental ao meu crescimento e formação pessoal.

A minha namorada Marcela Moreira da Rocha Almeida, por todo o amor, carinho, paciência, incentivo, por acreditar sempre em mim e me fazer uma pessoa melhor a cada dia.

Ao professor Francisco Nivaldo Aguiar Freire, pela excelente orientação, atenção, paciência e pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

A todos os meus professores da graduação, que diretamente contribuíram para minha formação acadêmica, transmitindo valiosos conhecimentos e experiências ao longo do curso, contribuindo no desenvolvimento deste trabalho.

À toda a minha família, que de tantas formas me apoiaram em todos os momentos.

Aos meus companheiros da Energo Engenharia e Consultoria em Energias, pelo excelente ambiente de trabalho, pela amizade e pelo conhecimento transmitido por cada um.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio e incentivo fornecido durante todos esses anos do curso.

“Wer sein Ideal erreicht, kommt eben damit
über dasselbe hinaus” (Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Com a tendência mundial em aumentar o consumo de energia para as próximas décadas, muitos países tem optado por focar sua geração de energia a partir de fontes alternativas, seja a partir do sol, dos ventos e/ou da biomassa. Neste cenário, a energia solar tem se destacado e tem se apresentado como uma alternativa interessante, principalmente à realidade brasileira. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias que realizem a otimização da geração de energia através desta fonte torna-se cada vez mais importante. Os sistemas de rastreamento solar estão entre essas tecnologias, que fazem com que sejam alcançados ganhos consideráveis na geração de eletricidade com relativa simplicidade. O rastreador solar (*tracker*) tem como função realizar o posicionamento da superfície de captação solar de modo que os raios solares incidam sempre de forma perpendicular na superfície, à medida que o Sol se movimenta ao longo do dia e ao longo do ano, fazendo com que seja aumentada a quantidade de energia solar captada.

Inicialmente são descritos diferentes aspectos relacionados ao uso de *trackers*, como características da radiação solar ótima que o rastreador solar busca para os módulos captarem, movimentos do Sol, cálculos da posição solar e tipos de *trackers* existentes. A revisão de literatura é feita baseando-se em estudos sobre sistemas de rastreamento solar realizados por pesquisadores ao redor do mundo. Por último, com o uso do software PVsyst, uma estimativa de quanto seria o ganho na energia solar captada é feita, comparando os cenários em uma usina solar fotovoltaica com o uso de *trackers* e com estrutura fixa, para a localidade de Pentecoste/CE. Os ganhos apresentaram-se significativos, obtendo-se um aumento de eficiência do sistema de aproximadamente 26%. Assim, com esses resultados teóricos obtidos nas simulações realizadas no software, o potencial do Ceará para o uso de mecanismos de rastreamento solar é mostrado.

Palavras-chave: Energia solar. Sistemas fotovoltaicos. Sistema de rastreamento solar.

ABSTRACT

With the worldwide trend of increasing energy consumption for the coming decades, many countries have decided to focus on alternative sources for energy generation, whether by considering the sun, wind or biomass as energy sources. In these conditions, solar energy is standing out and has been introduced as a very interesting option, specially to the reality of Brazil. Therefore, the development of technologies that optimize energy generation through this source becomes increasingly important. Solar tracker systems are among these technologies, which allow for the achievement of substantial gains in generation of electricity with considerable simplicity.

A solar tracker establishes the positioning of the solar capturing surface so that the incidence always occurs perpendicularly to the surface as the sun moves throughout the day and throughout the year, increasing the amount of captured solar energy. The present paper initially describes different aspects related to the use of trackers, like characteristics of optimal solar radiation that the solar tracker aims to achieve for the modules to capture, movements of the sun, calculations of the sun's position and existing types of trackers. The bibliographic references are based on studies on solar tracking systems conducted by researchers around the world. Lastly, an estimate is created of how much gain would be achieved with the captured solar energy using the PVsyst software, comparing the scenarios of a photovoltaic solar plant with the use of trackers and with fixed structure for the location of Pentecoste, State of Ceará. The gains were significant, and a system efficiency increase of approximately 26% was obtained. Thus, Ceará's potential for the use of solar tracking mechanisms is revealed with these theoretical results obtained in the simulations carried out by the software.

Keywords: Solar energy. Photovoltaic systems. Solar tracking systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da matriz elétrica brasileira	19
Figura 2 – Ilustração das componentes da radiação solar ao nível do solo	24
Figura 3 – Representação das estações do ano e movimento da Terra em torno do Sol	25
Figura 4 – Inclinação do eixo polar em relação ao plano de órbita da Terra	26
Figura 5 – Estrutura de uma instalação fotovoltaica	27
Figura 6 – Estrutura cristalina do silício	28
Figura 7 – Configuração de um inversor central	32
Figura 8 – Configuração de um inversor descentral	33
Figura 9 – Diagrama funcional de um rastreador solar	35
Figura 10 – Comparação entre a energia gerada em um dia por um sistema fixo e um sistema de rastreamento solar	36
Figura 11 – Sistema de rastreamento solar passivo	38
Figura 12 – Estimativa da energia produzida por um sistema de 1 KWp usando variados tipos de seguidores de diferentes cidades	39
Figura 13 – Sistema de seguidor horizontal N-S	40
Figura 14 – Seguidor solar de dois eixos	42
Figura 15 – Dados gerados pela base de dados Meteonorm para Pentecoste	44
Figura 16 – Área do projeto	45
Figura 17 – Tela de configurações para a orientação dos módulos	50
Figura 18 – Definição dos componentes do sistema	51
Figura 19 – Análise de sombreamento	53
Figura 20 – Diagrama de perdas no decorrer de um ano para uma usina com estrutura	

fixa	56
Figura 21 – Estratégia de backtracking	57
Figura 22 – Diagrama de perdas no decorrer de um ano para uma usina com trackers de eixo único N-S	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equipamento escolhido para o dimensionamento no PVsyst	49
Tabela 2 – Parâmetros de simulação	54
Tabela 3 – Principais resultados para a usina com estrutura fixa	55
Tabela 4 – Principais resultados para a usina com sistema de rastreamento solar	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
AutoCAD	Software para elaboração de desenhos técnicos
a-Si	Silício Amorfo
BIG	Banco de Informações de Geração
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CdTe	Telureto de Cádmio
CIS/CIGS	Cobre, Índio e Gálio Seleneto
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IAM	<i>Incidence Angle Modifier</i>
IFC	International Finance Corporation
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LER	Leilão de Energia Reserva
LID	<i>Light Induced Degradation</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum power point tracker</i>
PV	Fotovoltaico
PVsyst	Software para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos
PR	<i>Performance Ratio</i>
OPV	Células Fotovoltaicas Orgânicas
UFV	Usina Solar Fotovoltaica
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivos	21
1.2.1. Objetivo Geral	21
1.2.2. Objetivos Específicos	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. Energia e Radiação Solar	22
2.1.1. Movimento da Terra	25
2.1.1.1. Declinação solar	25
2.2. Equipamentos e Tecnologias de um Sistema Fotovoltaico	26
2.2.1. Módulos Fotovoltaicos	27
2.2.1.1. Tecnologias existentes	30
2.2.1.1.1. Silício monocristalino	30
2.2.1.1.2. Silício policristalino	30
2.2.1.1.3. Filmes Finos	31
2.2.2. Inversores	31
2.2.3. Sistemas Fotovoltaicos	34
2.3. Seguidores Solares - Trackers	34
2.3.1. Rastreamento solar passivo	37
2.3.2. Rastreamento Solar Ativo	38
2.3.2.1. Seguidor de eixo horizontal	39
2.3.2.2. Seguidor de eixo polar	40
2.3.2.3. Seguidor de eixo vertical	40
2.3.2.4. Seguidor polar de dois eixos	41
3. METODOLOGIA	43
3.1. Obtenção dos Dados Para a Alimentação do Programa	43
3.2. Visão Geral Sobre o Software Utilizado (PVSYST)	45
3.2.1. Funcionalidades	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. Metodologia de Cálculos – PVSYST	49
4.2. Análise dos Ganhos de Captação de Irradiância Solar Com o Uso de Trackers – Aplicação e Resultados	53

4.2.1. <i>Usina com Estrutura Fixa</i>	55
4.2.2. <i>Usina com Sistema de Rastreamento Solar</i>	56
5. CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A – RELATÓRIO ESTRUTURA FIXA	65
APÊNDICE B – RELATÓRIO TRACKERS DE 1 EIXO N-S	69

1. INTRODUÇÃO

Tendo como base o aumento do consumo de energia elétrica no mundo e a iminente escassez de recursos necessários para a geração de energia por meio de fontes de energia convencionais esgotáveis, como os combustíveis fósseis, cada vez mais tem se tornado importante o uso de fontes de energias renováveis. Outro agravante que tem acelerado essa busca por fontes alternativas de energia é a emissão de poluentes na atmosfera e a preocupação com a preservação do meio ambiente (CRESESB, 2006). Por conta disso, grandes investimentos têm sido feitos em fontes de energia limpas e renováveis, como a solar e a eólica, visando o desenvolvimento sustentável (PALZ, 2005).

Entre as fontes renováveis citadas, a energia solar é uma das que tem crescido bastante nos últimos anos, em especial a energia solar fotovoltaica. Os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica estão se tornando extremamente populares e a tendência é a cada ano aumentar sua utilização, devido à forte e constante redução no custo de instalação e ao aumento da eficiência das células nos módulos. Esta tecnologia ainda se mostra bastante vantajosa quando observada sua vida útil de quase 30 anos e sua fácil reciclagem após esse longo período (BRAGA, 2008).

Segundo o guia “Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants”, de 2015, da International Finance Corporation (IFC), a tecnologia solar fotovoltaica vem se tornando uma opção de fornecimento de energia cada vez mais importante, com uma capacidade instalada superior a 137 GW em todo o mundo e possuindo adições anuais de cerca de 40 GW nos últimos anos. O guia afirma inclusive um declínio substancial no custo das usinas solares fotovoltaicas (redução de cerca de 80% desde 2008), melhorando a competitividade desta tecnologia, reduzindo a necessidade de subsídios e possibilitando a energia solar de competir com outras opções de geração de energia em alguns mercados. Embora a grande maioria dos projetos em operação de energia solar estejam em economias desenvolvidas, a queda nos preços juntamente com o alto custo dos geradores à diesel, tem despertado um interesse crescente na tecnologia fotovoltaica em países emergentes.

O uso da energia solar é extremamente relevante em instalações remotas, como comunidades rurais isoladas, pois o baixo custo de manutenção e a modularidade facilitam a instalação de sistemas de captação da energia do sol em locais fora do alcance da rede de energia elétrica (ROCHA FILHO, 2013). Para essas áreas, instalações desse tipo

proporcionam diversos benefícios, como projetos sociais, agrícolas, de irrigação e de comunicação.

Porém, o alto custo e a baixa eficiência de equipamentos utilizados para conversão da energia solar em elétrica tem se mostrado como obstáculos para uma maior utilização da energia solar. Nos últimos anos, entretanto, diversos avanços têm sido realizados nas tecnologias de aproveitamento desse tipo de energia. Com crescente interesse na sua utilização, cada vez mais tem sido desenvolvidas soluções para aumentar o rendimento na geração de energia elétrica e também mais os bancos tem incentivado investimentos, tanto para pessoas físicas como jurídicas, promovendo opções bastante viáveis de financiamento, fazendo com que o uso de energia solar fotovoltaica se torne uma fonte de energia cada vez mais atrativa (ABINEE, 2012).

Entre essas tecnologias para se aumentar o rendimento no aproveitamento da energia solar, estão os rastreadores solares. Este mecanismo consiste em fazer com que a superfície de captação da energia solar acompanhe o movimento do sol ao longo do dia, se deslocando de leste a oeste no movimento de rotação da terra, e/ou ao longo do ano, se deslocando ao longo do eixo norte-sul no movimento de translação terrestre. O rastreamento do sol faz com que os raios solares incidam mais perpendicularmente na superfície de captação, o que proporciona que mais energia solar possa ser aproveitada (ROCHA FILHO, 2013).

Com o aumento de investimentos em energia solar de grande porte, o uso de tecnologias de rastreamento solar em grandes centrais geradoras fotovoltaicas tem se mostrado bastante vantajoso, proporcionando ganhos significativos da produção de energia, em relação a um sistema de estruturas fixas. Ocorre também um aumento na utilização de *trackers* em instalações autônomas, pois os custos envolvendo a eletrônica de controle e mecânica desta tecnologia vem diminuindo bastante, principalmente causados pelo avanço de novas tecnologias, que apresentam manutenções mais baratas e mais simples (ROCHA FILHO, 2013).

A implementação de novas ferramentas tecnológicas para rastreadores solares tornam os resultados mais confiáveis, pois trata-se de uma tecnologia relativamente simples e que proporciona aumentos na produção de energia significativos em troca de um investimento relativamente baixo, em comparação com o custo dos painéis fotovoltaicos. (VÉRAS, 2004).

Outro assunto importante de ser citado é sobre os leilões de energia, os quais são as principais formas de contratação de energia elétrica no Brasil. Nessas situações, as empresas que possuem usinas geradoras de energia elétrica são os vendedores de energia e os compradores são as concessionárias distribuidoras e transmissoras, que irão repassar a energia comprada ao consumidor final (EPE, 2015).

Com o passar dos anos, os leilões conseguiram obter uma grande importância para a sustentabilidade do setor elétrico brasileiro. Foi a partir deles que se realizam a concessão de novas usinas e contratos de fornecimento fechados para atender à demanda futura das distribuidoras de energia. Em termos de coordenação hierárquica, todos os leilões de energia passam pela coordenação e controle da Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL, a qual, por sua vez, é ligada ao ministério das minas e energia (MME).

O leilão de energia é um processo licitatório, em que uma concorrência é promovida pelo poder público com o objetivo de se obter energia elétrica em um prazo futuro, pré-determinado nos termos de um edital, seja pela instalação de novas usinas de geração de energia, linhas de transmissão até os centros consumidores ou mesmo a energia que é gerada em usinas em operação e com os investimentos já pagos, sendo conhecidas no setor como “energia velha” (EPE, 2015).

A ausência de leilões gera dificuldade ao setor elétrico no que diz respeito ao equilíbrio entre a oferta e o consumo de energia, aumentando conseqüentemente os riscos de falta de energia e racionamento. Nos leilões, ao definirem-se os preços dos contratos, definem-se também a participação das fontes de energia utilizadas na geração, o que impacta na qualidade da matriz energética do país em aspectos ambientais, bem como no valor das tarifas pagas pelos consumidores.

Projetos de usinas de energia solar começaram a ser aprovados nos leilões a partir do sexto leilão de energia reserva (LER), em 2014. Desde então, foram contratados 94 projetos de usinas solares fotovoltaicas, de acordo com o portal da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), totalizando uma capacidade de 2,65 GW de energia solar no Brasil.

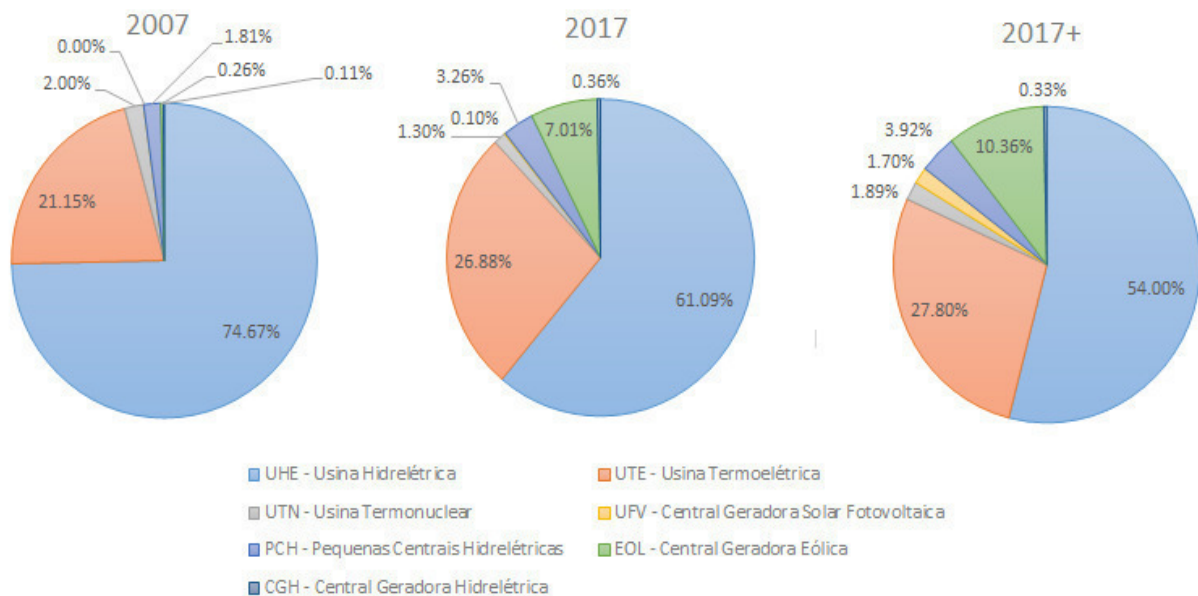
Os projetos foram contratados nos leilões de 2014 e 2015, tendo sido contratado 889 MW em 2014 e 1,76 GW em 2015. O leilão que ocorreria em 2016 teve que ser cancelado, e a expectativa é de que no segundo semestre de 2017 volte a ocorrer normalmente e que diversos projetos sejam contratados no Ceará.

1.1. Justificativa

Devido a situação atual de crise energética na qual o Brasil ainda passa, a energia solar, juntamente com a eólica, apresentou-se como a aposta para tornar o país menos dependente à energia proveniente dos recursos hídricos, as quais, segundo o Banco de Informações de Geração (BIG, 2017), representam mais de 60% da capacidade de geração do Brasil. As fontes hídricas possuem características intermitentes e imprevisíveis, fazendo com que essa grande dependência apresente riscos e discontinuidades na produção, podendo provocar crises energéticas e ocasionando condições mais custosas de geração de energia.

Na figura 1, os gráficos da esquerda e do meio mostram a evolução da matriz elétrica brasileira nos últimos 10 anos e o da direita mostra a expectativa para o fim de 2017. É possível verificar a diminuição na participação da energia produzida a partir dos recursos hídricos, apesar de ainda ser a principal

Figura 1 – Evolução da matriz elétrica brasileira



Fonte: Elaborado pelo autor através de consultas a EPE e ao BIG.

A figura 1 retrata também o acentuado crescimento da participação das energias eólica e solar na matriz energética do país nos últimos dez anos. Verifica-se que de

2007 para 2017, as centrais geradoras eólicas cresceram bastante, de 0,26% para 7,01% de participação, enquanto a solar fotovoltaica continuou baixo, visto que em 2007 sua participação era nula e em 2017 é de 0,10%. Porém, a parcela da geração de energia solar fotovoltaica na matriz está passando por um crescimento bastante acelerado nesse ano e a expectativa é que termine o 2017 com 1,70% de participação. Isso se deve principalmente à diminuição dos custos dessa tecnologia e às linhas de créditos e boas opções de financiamento pelos bancos.

Analisando os dados da CCEE, muitos empreendimentos de grande porte foram contratados no último leilão e a expectativa é que o número de projetos dobrem no próximo. A tecnologia está “barateando”, grandes fabricantes se instalando no país e a tendência é que finalmente o imenso potencial solar do Brasil seja bem aproveitado.

Em usinas solares de grande porte, com grandes investimentos, a busca por obter esse melhor aproveitamento da energia solar é muito importante. O uso de rastreadores solares para fins de otimização da produção de energia de sistemas fotovoltaicos está comprovado e já é utilizado em diversas instalações no mundo, seja para micro, mini ou macro geração. Porém, no Brasil, essa tecnologia ainda não se encontra tão presente, muito por causa do elevado custo adicional ao projeto. Isto se deve tanto por ser uma solução relativamente recente no mercado nacional, como também pelos custos altos em sua instalação e manutenção.

O interesse na tecnologia de rastreadores solares se deve ao fato de ser uma alternativa pouco utilizada no Brasil, e já mostra resultados em todo o mundo de que fornece ganhos relevantes na produção de energia elétrica quando comparada a sistemas de estruturas fixas, com facilidade e custos baixos. Para um país com um potencial considerável para a captação de energia solar, essa questão deve ser melhor analisada e discutida tendo em vista o ganho considerável que há com o uso de *trackers* nas instalações.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo Geral*

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar de forma quantitativa, a partir de dados simulados, o ganho efetivo com a utilização de um sistema de rastreadores solares em uma usina solar fotovoltaica (UFV) no Ceará.

1.2.2. *Objetivos Específicos*

A partir do direcionamento apresentado no escopo do trabalho, o estudo apresentado a seguir tem como objetivos específicos:

- Comparar a produção de energia de uma usina fotovoltaica de grande porte com sistema de rastreamento solar x estrutura fixa, no interior do estado do Ceará, no município de Pentecoste;
- Analisar os ganhos de captação de irradiância solar com o uso de sistema de rastreamento solar (*trackers*).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico tem como objetivo apresentar uma base teórica dos conceitos para um melhor entendimento dos demais tópicos deste trabalho. São apresentados conceitos importantes relacionados a projetos de sistemas fotovoltaicos, além de mostrar tópicos significativos presentes em estudos já realizados. O conteúdo abordado está organizado em três seções distintas:

A primeira apresenta uma revisão básica sobre radiação solar, explicando os tipos de radiação e alguns tipos de instrumentos de medição, bem como aspectos gerais da energia solar, como importância, características e formas de uso, sobretudo a incidência da radiação direta do sol, importante para o conhecimento do movimento do sol ao longo do dia e do ano para um sistema de rastreamento solar.

A segunda seção descreve sobre os equipamentos empregados para o aproveitamento elétrico da energia solar, como módulos fotovoltaicos, inversores e os componentes elétricos, comentando vantagens, desvantagens, técnicas de melhoria na eficiência da conversão da energia solar e outros tópicos como a forma da conversão da energia solar em elétrica, tipos de células fotovoltaicas e características elétricas dos módulos.

A terceira parte comenta sobre os sistemas de rastreamento solar, abordando princípios de funcionamento, tipos de seguidores e tipos de sistemas de controle de seguimento.

2.1. Energia e Radiação Solar

A energia solar pode ser definida como aquela energia proveniente do Sol, seja na sua forma de calor (energia térmica) ou de luz (energia luminosa). Ela representa a maior fonte de energia presente no nosso planeta, podendo ser considerada inesgotável e apresentando um grande potencial de utilização em sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como a energia elétrica através de painéis fotovoltaicos ou a energia térmica através de coletores planos e concentradores solares.

Quase todas as outras fontes de energia (eólica, biomassa, combustíveis fósseis, hidráulica e energia dos oceanos) são derivadas direta ou indiretamente da energia do Sol. É a

partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade por meios hidroelétricos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento da radiação solar. A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos (CRESESB, 2006).

Segundo Foster, Ghassemi e Cota (2009), o Sol fornece cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia para a atmosfera terrestre, o que corresponde a algo em torno de 10.000 vezes o consumo de energia na Terra durante o mesmo período. Eles complementam ainda, que o planeta recebe cerca de 10 vezes mais energia solar a cada ano do que aquela contida em todas as reservas conhecidas de petróleo, carvão, gás natural e urânio somados. Entretanto, o que não possibilita atualmente um maior aproveitamento de toda essa energia é o fato de que os equipamentos que realizam a conversão da energia do Sol em energia elétrica possuem um custo elevado, o que pode inviabilizar a sua utilização. Porém, como há atualmente um crescente aumento na produção e utilização destes equipamentos, o preço total das instalações deve diminuir, possibilitando com que uma maior parte da população possa ser beneficiada.

Para quantificar a intensidade de energia solar que chega à superfície terrestre, uma relação geométrica entre o Sol e a Terra deve ser feita, que tem como variáveis fatores como: latitude e longitude do local, data e estação do ano, hora do dia e posição do Sol.

A radiação solar é determinada como a quantidade de energia captada do sol em determinada área e em um determinado período de tempo. É medida em joules por metro quadrado (J/m^2) ou, mais comumente, watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2). Essa quantidade de energia captada é denominada como a irradiância solar, que é a potência (energia dividida pelo tempo) da radiação solar por unidade de área e medida em watts por metro quadrado (W/m^2) (OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Souza (2014), a quantidade de radiação que chega ao chão, no plano horizontal, depende da localização geográfica, das condições atmosféricas e da estação do ano, pois a atmosfera terrestre age como um filtro que bloqueia parte da energia irradiada pelo sol. Devido a esses fatores, a máxima irradiância que chega à superfície terrestre é em torno de $1000 W/m^2$.

A energia proveniente do Sol pode ser aproveitada, basicamente, de três formas: química, elétrica e térmica. Neste trabalho, uma abordagem da conversão elétrica da

energia solar é realizada, entretanto o mecanismo de rastreamento solar pode ser utilizado em basicamente todas as aplicações que utilizem a energia do Sol.

Nem toda a radiação solar (luz e calor) que atinge as camadas mais externas da atmosfera terrestre consegue chegar ao nível do solo. A maior parte é refletida de volta ao espaço ou absorvida pela atmosfera, e somente uma pequena parcela chega à superfície. Esta parcela pode ser dividida em duas componentes, a componente direta e a componente difusa, conforme ilustrado na Figura 2.

Caso a superfície de incidência da radiação solar apresentar alguma inclinação com a horizontal, haverá mais uma parcela da radiação que será refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, terreno rochoso). Denomina-se de albedo o índice de reflexão dessas superfícies.

Figura 2 – Ilustração das componentes da radiação solar ao nível do solo



Fonte: CRESESB, 2006

De acordo com Cooper e Martins Júnior (2013), o Brasil apresenta um bom nível de irradiação solar, principalmente no nordeste, em regiões secas de baixa latitude e no litoral leste, com valores médios anuais entre 1200 e 2400 kWh/m²/ano. Quando comparados a maioria dos países europeus, estes valores mostram-se superiores, tendo em vista que a Alemanha tem um valor médio anual de 1250 kWh/m²/ano, França fica entre 900 e 1650 kWh/m²/ano e a Espanha entre 1200 e 1850 kWh/m²/ano.

A radiação direta tem valor zero quando o sol está totalmente encoberto por nuvens e é o tipo de radiação que os rastreadores solares buscam durante o dia.

2.1.1. Movimento da Terra

É fundamental para qualquer sistema que possa utilizar a energia solar ter o conhecimento a respeito da movimentação da Terra ao redor do Sol, de modo a sempre procurar obter o máximo de eficiência na captação dessa energia.

Diariamente o planeta realiza seu movimento de rotação, ao girar em torno de seu próprio eixo, e anualmente realiza seu movimento de translação, descrevendo uma trajetória elíptica ao redor do Sol, como ilustrado na figura 3. Esses movimentos, aliados a outros fatores, como a latitude local, faz com que haja uma variação do ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre ao longo dos dias e durante o dia, ocasionando uma variação na quantidade de energia captada pelo sistema de uso da energia solar (VÉRAS, 2004). Esta característica induz, conforme o caso, à seleção de um sistema apropriado de armazenamento da energia resultante do processo de conversão.

Figura 3 – Representação das estações do ano e movimento da Terra em torno do Sol



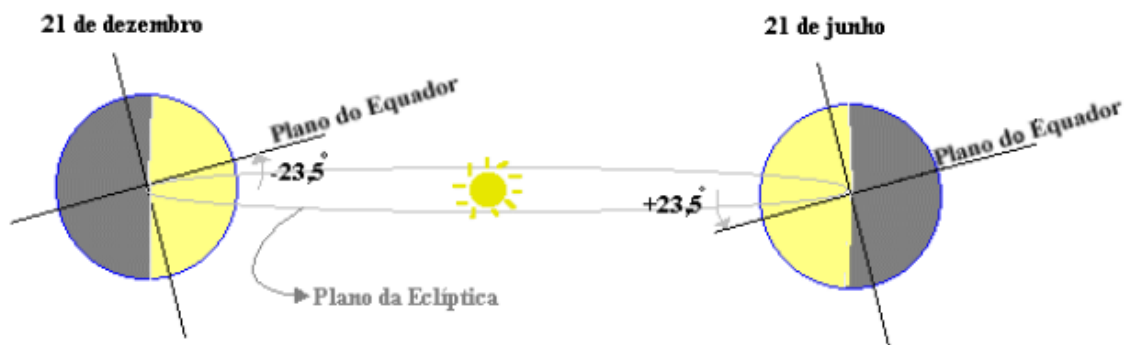
Fonte: ANEEL, 2002

2.1.1.1. Declinação solar

Considerando a distância da Terra ao Sol e a diferença dos seus diâmetros, a declinação do Sol é o ângulo entre os raios solares e o plano do equador. Como o ângulo entre o eixo de rotação da Terra e o plano da órbita terrestre se mantém constante, em um

determinado período do ano, a declinação do Sol varia regularmente ao longo do ano, repetindo o padrão que origina as estações do ano. Quando a projeção do eixo da Terra sobre o plano da órbita terrestre coincide com a linha que liga os centros da Terra e do Sol, o ângulo entre os raios do Sol e o plano do equador é máximo, atingindo aproximadamente $23^{\circ} 5'$ (PALZ, 2005), como esquematizado na figura 4.

Figura 4 – Inclinação do eixo polar em relação ao plano de órbita da Terra



Fonte: Nave Astro.

2.2. Equipamentos e Tecnologias de um Sistema Fotovoltáico

Uma usina fotovoltaica conectada à rede possui como principais componentes os módulos fotovoltaicos, inversores e uma subestação, conforme a Figura 5. É importante entender algumas nomenclaturas usuais nos projetos fotovoltaicos. Uma “string” é uma associação, geralmente em série, de vários módulos fotovoltaicos.

Figura 5 – Estrutura de uma instalação fotovoltaica



Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

Os módulos são painéis retangulares que convertem a energia solar em energia elétrica. Em usinas de grande porte, de acordo com é comum utilizar módulos que produzem energia de cerca de 310 Wp (Watt peak – potência máxima produzida pelo módulo), possuem tensão de operação na ordem de grandeza de três dezenas de volts e possuem dimensões próximas de 2 m x 1 m x 0,04 m (altura, largura e espessura).

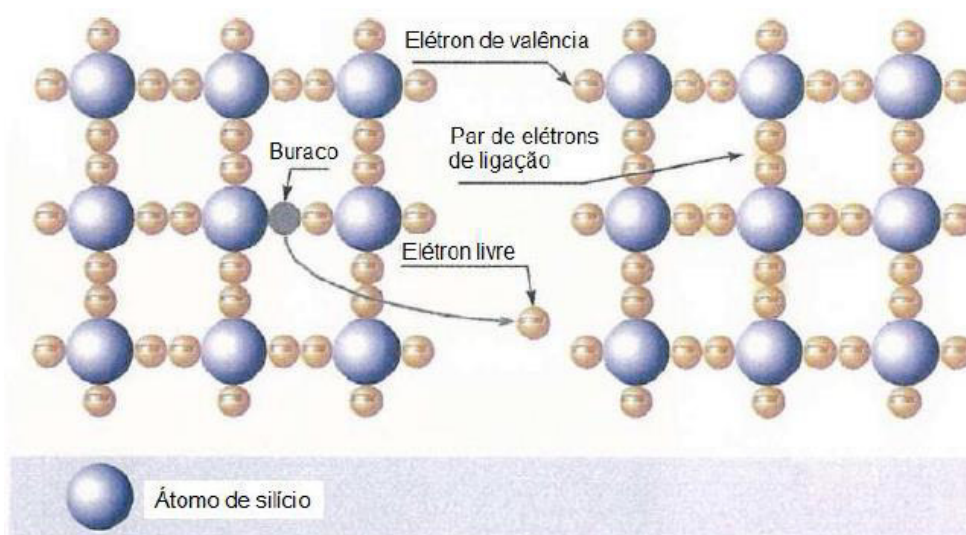
A estrutura mecânica que serve de base para as strings é chamada de mesa fotovoltaica. As strings são conectadas através de caixas de conexão cuja saída seguirá até um inversor, que transformará a tensão de corrente contínua produzida pelos módulos em tensão de corrente alternada, necessária para a transmissão na rede elétrica. Antes de ser injetada na rede, as saídas dos inversores seguem para as subestações unitárias que abrigam os transformadores. Estes elevarão a tensão do sistema para aí sim poderem ser conectadas à rede de distribuição de energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.1. Módulos Fotovoltaicos

O conceito sobre energia solar fotovoltaica é, de maneira mais simples: toda energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, a partir do efeito fotovoltaico. Este fenômeno, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é observado a partir de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Assim, ao serem conectadas por um fio externo, uma corrente elétrica será criada e circulará através desse fio. Portanto, a célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão (CRESESB, 2006).

Os módulos fotovoltaicos são compostos por um conjunto de células fotovoltaicas que realizam a conversão da energia solar em energia elétrica. Tomando como exemplo uma célula de silício cristalino, na figura 6, descreve-se o funcionamento das células solares.

Figura 6 – Estrutura cristalina do silício



Fonte: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008

Para a fabricação das células, é necessária a utilização de cristais de alta qualidade e silício com alto grau de pureza. Os átomos de silício formam uma estrutura cristalina estável e cada um destes átomos possuem quatro elétrons de ligação (elétrons de valência). Para formar uma configuração estável na estrutura cristalina, dois elétrons vizinhos formam um par de ligações. Dessa forma, o silício atinge sua configuração de gás nobre com oito elétrons vizinhos. Uma ligação elétrica pode ser quebrada pela ação de luz ou calor e assim o elétron fica livre e deixa um buraco na estrutura cristalina. Isto é conhecido como condutividade intrínseca (BRAGA, 2008).

Montando um conjunto de células conectadas em série, agrupadas e laminadas envolvido entre camadas de plástico e vidro, o módulo é formado. Cada conjunto possui uma estrutura de reforço que lhe proporciona rigidez e facilidade para manipulação e instalação. O módulo dispõe ainda de uma caixa de junção, onde ficam armazenadas suas conexões condutoras responsáveis por transferir a energia gerada ou associá-lo a outro equipamento (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009).

De acordo com Ribeiro, Prado e Gonçalves (2012), esta tecnologia apresenta-se como uma boa alternativa para os problemas ambientais, como já citados anteriormente, apresentando um balanço positivo entre as vantagens e as desvantagens. As seguintes vantagens desta tecnologia podem ser citadas:

- ✓ Fonte de energia limpa, renovável e esgotável, sem emissões de poluentes e com impactos ambientais mínimos;
- ✓ Os módulos são de fácil manuseio e manutenção;
- ✓ Tecnologia que pode ser utilizada tanto em baixa como em alta potência;
- ✓ Longa vida útil – cerca de 30 anos.

As desvantagens apresentadas dessa tecnologia são:

- ✓ Custos elevados de instalação e de produção de energia, quando comparado com outras fontes de energia;
- ✓ Baixa eficiência dos módulos;
- ✓ A captação de energia solar incidente depende de fatores como tempo, clima e orientação do módulo em relação ao sol.

Tendo em vista a minimização destas desvantagens, de forma que a geração fotovoltaica possa se tornar cada vez mais uma solução mais atrativa e competitiva, faz-se uso de determinadas medidas, como (RIBEIRO; PRADO; GONÇALVES, 2012):

a) maximizar a transferência de energia do painel para a carga: faz-se uso da técnica de procura de ponto de máxima potência da característica tensão *versus* corrente do painel de modo a garantir o casamento de impedância entre o painel e a carga, diminuindo assim a perda de rendimento causada por essa característica do painel;

b) aumentar a eficiência das células fotovoltaicas: sendo os painéis fotovoltaicos constituídos de células fotovoltaicas, uma melhora no rendimento dos painéis ocorre com um aumento na eficiência das células. Por isso, constantemente têm sido feitas pesquisas em busca de materiais que promovam essa eficiência, com uma tendência para a redução de preço dos painéis devido ao aumento da escala de produção e das novas tecnologias de materiais e fabricação. Neste trabalho, na seção que trata de células fotovoltaicas, serão dados mais detalhes acerca da eficiência de alguns tipos de células;

c) aumentar a captação da energia incidente no painel: a radiação solar incidente em um painel pode ser maximizada através da instalação de equipamentos seguidores solares, que têm como objetivo procurar manter o painel sempre perpendicular aos raios solares incidentes. Será nessa técnica que será dado maior enfoque neste trabalho.

Ao se realizar o dimensionamento e a instalação de módulos fotovoltaicos, é necessário que haja atenção redobrada com sombreamentos nos painéis e com que esses efeitos não venham a acontecer durante os anos de operação deles. O sombreamento dos módulos geralmente está associado aos seguintes fatores:

- Distância entre as strings de módulos fotovoltaicos – caso as strings sejam montadas sem ser respeitado uma distância mínima;
- Perdas de orientação caso seja utilizado sistema de rastreamento solar.

2.2.1.1. Tecnologias existentes

As tecnologias mais difundidas atualmente são as células de silício cristalino (monocristalino ou policristalino), de filmes finos (silício amorfo e telureto de cádmio).

2.2.1.1.1. Silício monocristalino

Esta tecnologia é a mais usada comercialmente e também a mais eficiente, chegando até 15% para uso comercial e 18% em células feitas em laboratório, quando comparada às células de silício policristalino e silício amorfo, porém são mais caras. Células monocristalinas também apresentam um processo de fabricação relativamente simples (TIRADENTES, 2007).

2.2.1.1.2. Silício policristalino

A célula de silício policristalino apresenta um processo de fabricação menos rigoroso e eficiência inferior, se comparada com a célula de silício monocristalino, chegando à faixa de 13%. Sua grande vantagem perante as demais é seu menor custo (Tiradentes, 2007).

2.2.1.1.3. Filmes Finos

O módulo fotovoltaico de filme fino pode ser caracterizado pelo material fotovoltaico contido em seu substrato. Este material pode ser silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre, índio e gálio seleneto (CIS/CIGS) e células fotovoltaicas orgânicas (OPV). Apresentam como vantagens o baixo custo de fabricação, é menos sensível ao sombreamento, possui flexibilidade, tendo assim um maior leque de aplicabilidade. Porém, quando comparada com as tecnologias de silício cristalino, perdem em sua eficiência e em sua durabilidade e garantia.

2.2.2. *Inversores*

Os inversores são dispositivos eletrônicos que convertem a eletricidade de corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos na eletricidade de corrente alternada (CA), idealmente em conformidade com os requisitos da rede local. A tensão CA de saída deverá ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequadas às cargas a serem alimentadas. No caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão de rede.

Este equipamento também pode desempenhar uma variedade de funções para maximizar a produção da planta. Estes variam desde a otimização da tensão em todas as strings e ao monitoramento do desempenho das strings até os dados de registro, proporcionando proteção e isolamento em caso de irregularidades na grade ou com os módulos fotovoltaicos (IFC, 2015).

Além de realizar a conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, alguns inversores interativos possuem um sistema de seguidor de máxima potência ou MPPT (sigla do inglês – maximum power point tracking). De acordo com Foster; Ghassemi e Cota

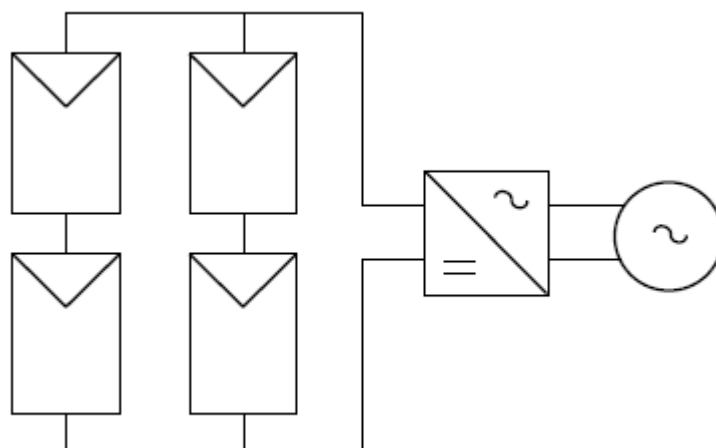
(2009), esse mecanismo permite a obtenção do máximo de potência do arranjo fotovoltaico mesmo com as variações de temperatura e intensidade solar.

Para a determinação de qualidade dos inversores, deve-se verificar sua eficiência de conversão. Segundo Tavares Pinho e Galdino (2014, p. 231), a eficiência dos inversores não é constante e seu valor depende da potência demandada pelos equipamentos de consumo e de seu fator de potência. Os fabricantes normalmente informam a eficiência na carga nominal, mas nem sempre destacam o fato de que sob cargas parciais suas máquinas apresentam baixas eficiências. Para sistemas com necessidades variáveis de potência, cargas parciais com altas eficiências são importantes.

Existem duas classes amplas de inversores: inversores centrais e inversores descentrais. Os centrais são inversores trifásicos de grande porte, com potência para atuar em uma faixa de centenas de KWp até MWp e são utilizadas em usinas fotovoltaicas.

A configuração do inversor central mostrada na figura 7 é geralmente a primeira escolha para muitas plantas fotovoltaicas solares de grande e médio porte. Um grande número de módulos são conectados em uma série para formar um fio de alta tensão (AT). As strings são então conectadas em paralelo ao inversor.

Figura 7 – Configuração de um inversor central



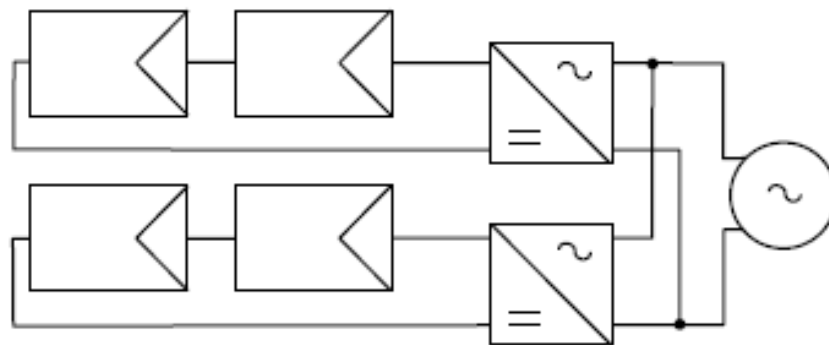
Fonte: IFC, 2015

Os inversores centrais oferecem alta confiabilidade e simplicidade de instalação. São também mais baratos, apresentam uma maior eficiência e uma maior

durabilidade. Porém, tem como desvantagens sua dificuldade de transporte devido ao seu tamanho, quantidade baixa de MPPTs e necessita de uma preparação de terreno antes de ser instalado.

Em contrapartida com os inversores centrais, os descentrais fornecem MPPT em um nível de string com todas as strings sendo independentes uma das outras. A utilidade disto se mostra nos casos em que os módulos não podem ser instalados com a mesma orientação, ou onde módulos de especificações diferentes estão sendo usados ou quando a instalação apresenta problemas de sombreamento (IFC, 2015).

Figura 8 – Configuração de um inversor descentral



Fonte: IFC, 2015

Outras vantagens são que os inversores descentrais podem receber manutenção ou podem ser substituídos por pessoas não especializadas. Sendo assim, caso haja necessidade de troca de equipamento, ocorre de forma rápida e simples. Também é recomendado manter inversores descentrais reservas para caso algum imprevisto venha a acontecer. Fazendo uma comparação, quando ocorre uma falha de um grande inversor central, é necessário que um técnico especializado vá até o local reparar a máquina, demandando um longo tempo e causando perdas de rendimento significativas.

2.2.3. *Sistemas Fotovoltaicos*

O sistema fotovoltaico pode ser definido como o conjunto de equipamentos e componentes responsáveis por fazer a conversão da energia incidente do sol em energia elétrica. Tais sistemas podem ser classificados de três maneiras, de acordo com sua aplicação final: *on-grid* ou conectado à rede, *off-grid* ou desligado à rede (conhecido também como isolado ou autônomo) e híbrido, em que apresenta mais de uma fonte de geração de energia (SOUZA, 2014).

Basicamente, um sistema fotovoltaico é composto dos seguintes dispositivos (IFC, 2015):

- Módulos fotovoltaicos – responsáveis pela captação de energia solar;
- Inversores – responsáveis por converter a corrente fornecida pelos módulos (CC) em corrente alternada (CA);
- Caixas de junção – responsáveis por unir um certo número de strings (devem ser escolhidas de acordo com algumas características, como tensão e corrente de entrada);
- Transformador – responsável por aumentar a tensão obtida pelo inversor para a tensão de rede de transmissão na qual a UFV será conectada (nas usinas, o transformador normalmente fica instalado em uma estrutura de alvenaria chamada de subestação unitária);
- Estruturas de base – sistemas fixos ou *trackers*;
- Banco de baterias – responsável pelo armazenamento de parte da energia gerada;
- Controlador de carga – dispositivo com função de evitar sobrecarga ou descarga excessiva das baterias.

2.3. Seguidores Solares - *Trackers*

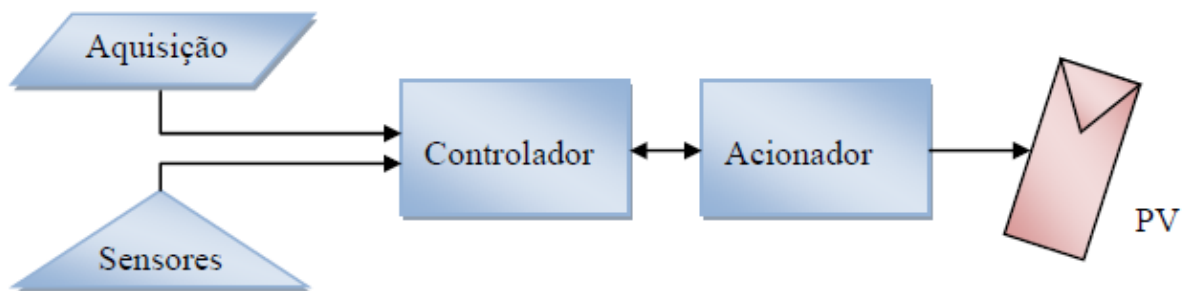
Os sistemas fotovoltaicos, conforme dito anteriormente, estão em constante crescimento no mercado brasileiro, mas ainda tem uma parcela de participação bastante baixa na matriz energética nacional. Isto se deve principalmente pelos altos custos que essa tecnologia ainda possui e com a baixa eficiência apresentada pelos painéis comercializados.

Com isso, algumas soluções tem sido desenvolvidas e a que mais se destaca tem sido os sistemas de rastreamento solar, popularmente conhecidos como *trackers*.

Esse sistema tem como objetivo aumentar a captação da radiação solar pelo módulo fotovoltaico ao buscar manter sempre o plano dos módulos perpendiculares à radiação solar incidente, que é a situação mais favorável para o aproveitamento ótimo de energia. Tais sistemas podem ser utilizados praticamente todas as formas de captação da energia solar, ou seja, tanto para instalações fotovoltaicas como em coletores planos e concentradores solares.

Um sistema de rastreadores solares, em alguns casos, apesar de acrescentar em cerca de 20% o preço total de um sistema de geração fotovoltaica, também pode acarretar no aumento em algo na faixa de 40% as receitas geradas. Os rastreadores fotovoltaicos também geralmente apresentam um baixo custo de manutenção (GIL *et al.*, 2009). Existem diversos tipos de rastreadores solares, que variam em relação a custo, complexidade e funções, além de apresentar funcionamento com diferentes números de eixos e fornecerem diversos graus de precisão. A figura abaixo apresenta a composição básica de um sistema de rastreamento solar:

Figura 9 – Diagrama funcional de um rastreador solar



Fonte: Ribeiro; Leite do Prado e Gonçalves, 2012

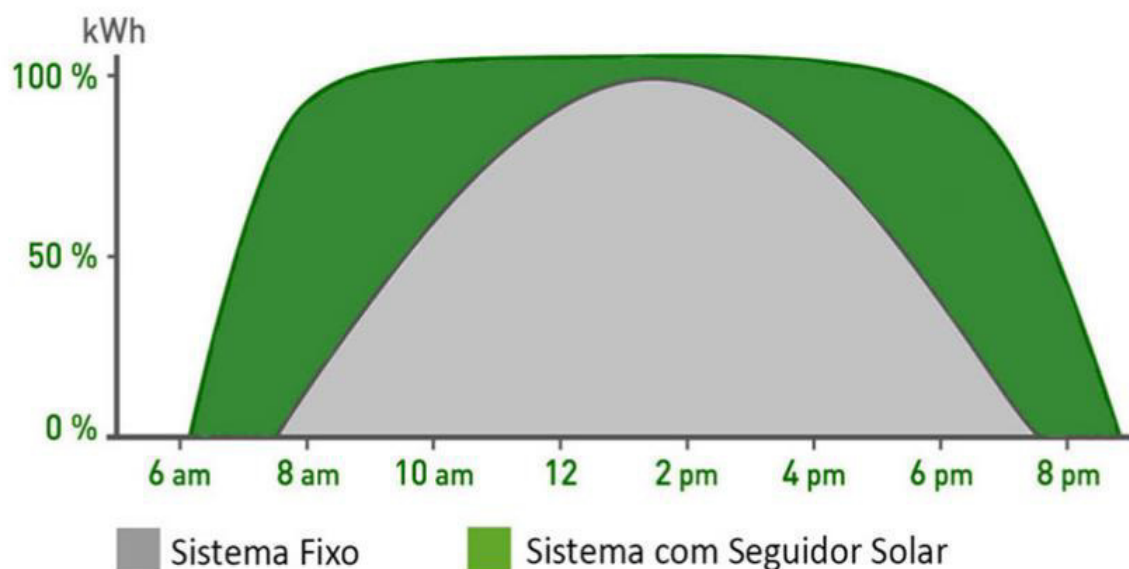
De acordo com Ribeiro, Leite do Prado e Gonçalves (2012), ao analisar a figura, os dados de latitude e longitude do local da instalação, as coordenadas solares e a hora solar para a inicialização da orientação do painel são fornecidos no bloco “Aquisição”. Em “Sensores”, os sinais de controle para a viabilização do rastreamento independente das coordenadas solares e horárias são fornecidos. Os sensores podem ser as próprias células fotovoltaicas, medidores de corrente, potência, de irradiância, ruído térmico ou fotoresistores (LDR – *Light Dependent Resistor*).

O bloco “Acionador” consiste em mecanismos, motores e os atuadores ao movimento dos módulos. O “Controlador” são os microcontroladores. Outros blocos funcionais podem agregar-se ao rastreador, tais como, relógio, temporizador, datalogger, interface homem/máquina (display, alarme, etc.), dependendo do seu tipo ou aplicação. Normalmente o rastreador solar integra-se ao MPPT, compartilhando recursos.

Como mencionado anteriormente, a geração de energia solar fotovoltaica só não teve um crescimento tão acentuado nos últimos dez anos, como houve com a energia eólica, devido ao seu alto custo de instalação e à baixa eficiência dos módulos. Com o passar dos anos, essa tecnologia foi se tornando mais barata, porém pouco mudou na eficiência dos módulos, seja utilizando células mono ou policristalinas e filmes finos.

Diversos avanços foram realizados na tecnologia de geração de energia fotovoltaica, e por conta disso, atualmente o uso desta tecnologia já está bem mais viável. Uma das soluções que tem mais agrado é a utilização de sistemas de rastreamento solar nas instalações de grande porte (CORTEZ, 2013). O aumento de eficiência total do sistema para alguns locais pode ser de quase 30%, mas ao analisar o sistema como um todo, é observado que em alguns casos esse ganho de produção não é tão vantajoso no ponto de vista financeiro, principalmente tendo como base o mercado brasileiro.

Figura 10 – Comparação entre a energia gerada em um dia por um sistema fixo e um sistema de rastreamento solar



Fonte: Portal Solar.

Projetos com *trackers* apresentam um aproveitamento melhor da energia do sol, mas o custo operacional e de manutenção às vezes não vale tanto à pena ao investidor, se tornando a principal desvantagem do uso dessa tecnologia (CORTEZ, 2013). Para o Brasil, a tendência é que o uso de *trackers* demore um pouco ainda para se consolidar. As principais empresas do ramo estão começando a se instalar no país e com certeza isso deverá influenciar na redução dos preços. Ainda assim, analisando para usinas de grande porte, essa tecnologia é já está se tornando atrativa.

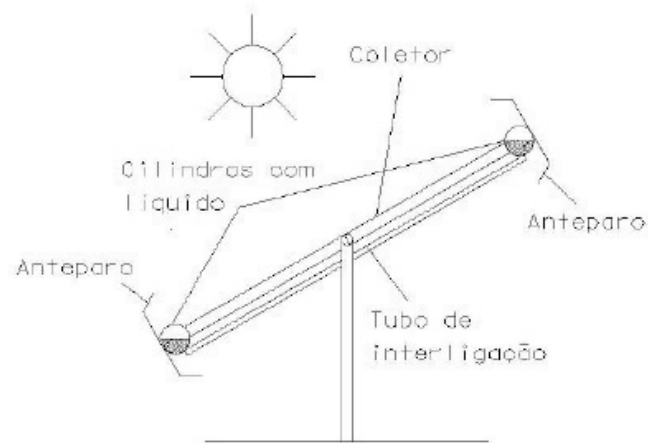
Os sistemas de rastreamento solar podem ser definidos em dois tipos: ativos ou passivos.

2.3.1. Rastreamento solar passivo

Esse tipo de seguidor é composto por dois cilindros nas extremidades leste e oeste do módulo solar, contendo na maioria das vezes um líquido denominado de Freon (CORTEZ, 2013), e um tubo de interligação entre estes, de modo a permitir a passagem do líquido de um para o outro, conforme ilustrado na figura 11. Ele funciona baseado na ação da força da gravidade, onde ocorre o aquecimento do líquido presente no cilindro que está recebendo a luz do sol (quando os raios solares não estão incidindo em um ângulo de 90° com o módulo), passando para a forma gasosa, se expandindo e se deslocando para o outro cilindro, onde irá se condensar e provocar o movimento do sistema ao deslocar o centro de gravidade do mesmo.

Um seguidor passivo é mais adequado em altas temperaturas e deve ser utilizado em locais onde a variação térmica seja suficiente para provocar a expansão do gás (CORTEZ, 2013). Apresenta vantagens como simplicidade de instalação e a não necessidade de outros mecanismos para o seu funcionamento, como motores. Em contrapartida, tem como desvantagens baixa precisão e é sensível a influência de ventos e a falta parcial da radiação solar, como em dias nublados (CLIFFORD; EASTWOOD, 2004).

Figura 11 – Sistema de rastreamento solar passivo



Fonte: Vêras, 2004.

2.3.2. Rastreamento Solar Ativo

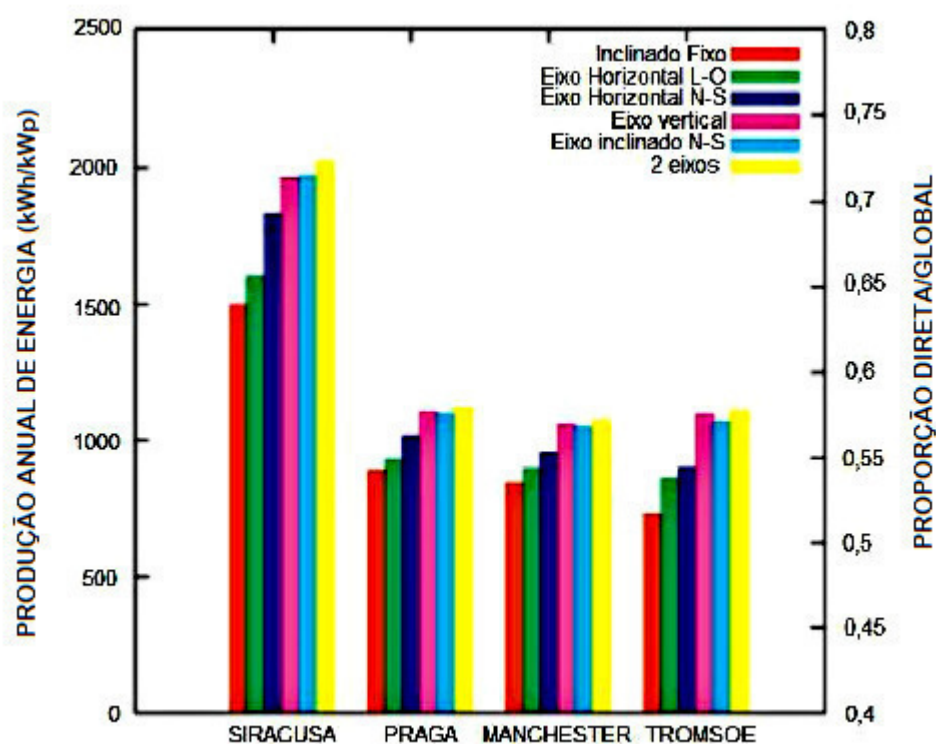
Os rastreadores ativos são caracterizados por possuírem diferentes tipos de rastreamento solar. Apresentam um sistema de controle com sensores, controladores e dispositivos atuadores, como motores, que permitem que o rastreamento solar seja realizado de forma ativa (CORTEZ, 2013).

Um rastreador ativo pode ser classificado, basicamente, de acordo com o tipo de movimento eixo realizado, em (CORTEZ, 2013):

- *Tracker* de eixo horizontal;
- *Tracker* de eixo polar;
- *Tracker* de eixo vertical;
- *Tracker* polar de dois eixos.

A figura abaixo ilustra uma comparação de energia produzida por diferentes tipos de rastreadores solares em diferentes locais.

Figura 12 – Estimativa da energia produzida por um sistema de 1 kWp usando variados tipos de seguidores em diferentes cidades



Fonte: Adaptado de CORTEZ, 2013

A seguir cada um desses tipos de seguidores e suas possíveis formas de controle de rastreamento serão descritos com mais detalhes.

2.3.2.1. Tracker de eixo horizontal

Neste tipo de *tracker*, os módulos fotovoltaicos são montados em cima de um eixo em forma de um tubo horizontal, apoiado em suportes. Esse tubo pode ser paralelo ao eixo norte-sul ou ao eixo leste-oeste, girando sobre seu eixo de forma a acompanhar o movimento do sol ao longo do dia, no caso de eixo norte-sul, ou ao longo do ano, no caso de eixo leste-oeste (CORTEZ, 2013).

Quando o eixo do painel for paralelo ao eixo leste-oeste, o sistema pode operar sem um sistema automático de rastreamento, funcionando conforme uma série de posições fixas estabelecidas anteriormente à instalação (CORTEZ, 2013). Esse tipo de rastreador solar

é utilizado também em concentradores solares com espelhos cilíndricos-parabólicos (ROCHA FILHO, 2013).

Suas vantagens são: baixo custo de instalação, simplicidade, robustez e pouca necessidade de manutenção. Este tipo de sistema permite também a montagem de múltiplos módulos sobre o mesmo eixo. As desvantagens deste tipo de sistema de rastreamento é a restrição de seu uso em estações com dias curtos, por não apresentar ganhos relevantes, e por sua eficiência não ser vantajosa como a dos outros tipos de rastreadores (CORTEZ, 2013).

Figura 13 – Sistema de rastreador solar horizontal N-S



Fonte: Apostila Solarize, 2017.

2.3.2.2. *Tracker de eixo polar*

O *tracker* de eixo polar apresenta um eixo inclinado, normalmente de acordo à latitude local, orientado na direção norte-sul e paralelo ao plano do módulo. Esse eixo será o eixo de rotação para o *tracker*. A inclinação desse eixo tem como objetivo fazer com que o coletor esteja perpendicular à radiação solar nos equinócios da primavera e outono, com um pequeno erro ocorrendo nos demais dias do ano (CORTEZ, 2013).

Este tipo de *tracker* é relativamente simples e faz com que haja um ganho interessante na eficiência do sistema (CORTEZ, 2013).

2.3.2.3. *Tracker de eixo vertical*

O *tracker* de eixo vertical, também denominado de *tracker* azimutal, apresenta um eixo fixo vertical ao plano terrestre, por onde o módulo irá rotacionar durante o dia, acompanhando o sol de leste a oeste conforme o ângulo de azimute, com o objetivo de manter o ângulo de azimute do sol igual ao ângulo de azimute da superfície. O ângulo de inclinação do módulo é obtido de acordo com a latitude local e é ajustado manualmente de acordo a estação do ano (CORTEZ, 2013).

Este tipo de mecanismo apresenta montagem mecânica e elétrica simples e de baixo custo, com manutenção também de baixo custo e robustez, apresentando menos 7% de radiação coletada que um *tracker* de dois eixos e mais 4% que um *tracker* de eixo polar (CORTEZ, 2013), e possuem bom desempenho em latitudes e estações do ano onde os dias são longos (IFC, 2015).

2.3.2.4. *Tracker polar de dois eixos*

Este tipo de rastreador apresenta uma haste vertical que permite o movimento no eixo Leste-Oeste, procurando manter o azimute de superfície igual ao azimute do Sol, e um poste horizontal, ao qual está presa a armação onde o módulo será montado (CORTEZ, 2013), que permite o movimento no eixo Norte-Sul, procurando manter a constante correção da inclinação do módulo em relação ao Sol, de modo que o ângulo de inclinação do painel seja complementar ao ângulo da altura solar. Na figura 13 é possível observar tais movimentações. Com a movimentação nesses dois eixos é maximizado o aproveitamento da radiação direta incidente no painel ao minimizar o ângulo de incidência dos raios solares.

Figura 14 – Seguidor solar de dois eixos



Fonte: Portal Solar.

As desvantagens desse tipo de rastreador, em relação aos outros tipos de rastreadores citados, consistem no grande esforço a que está sujeito todo o sistema, devido ao seu elevado peso, e a sua complexidade mecânica (CORTEZ, 2013).

Este tipo de seguidor é considerado o mais comum no mercado, sendo usados em parques solares, mas podendo ser utilizados também em sistemas de menor capacidade, com um menor número de módulos. Esta versatilidade é uma de suas principais vantagens (GIL et al., 2009).

3. METODOLOGIA

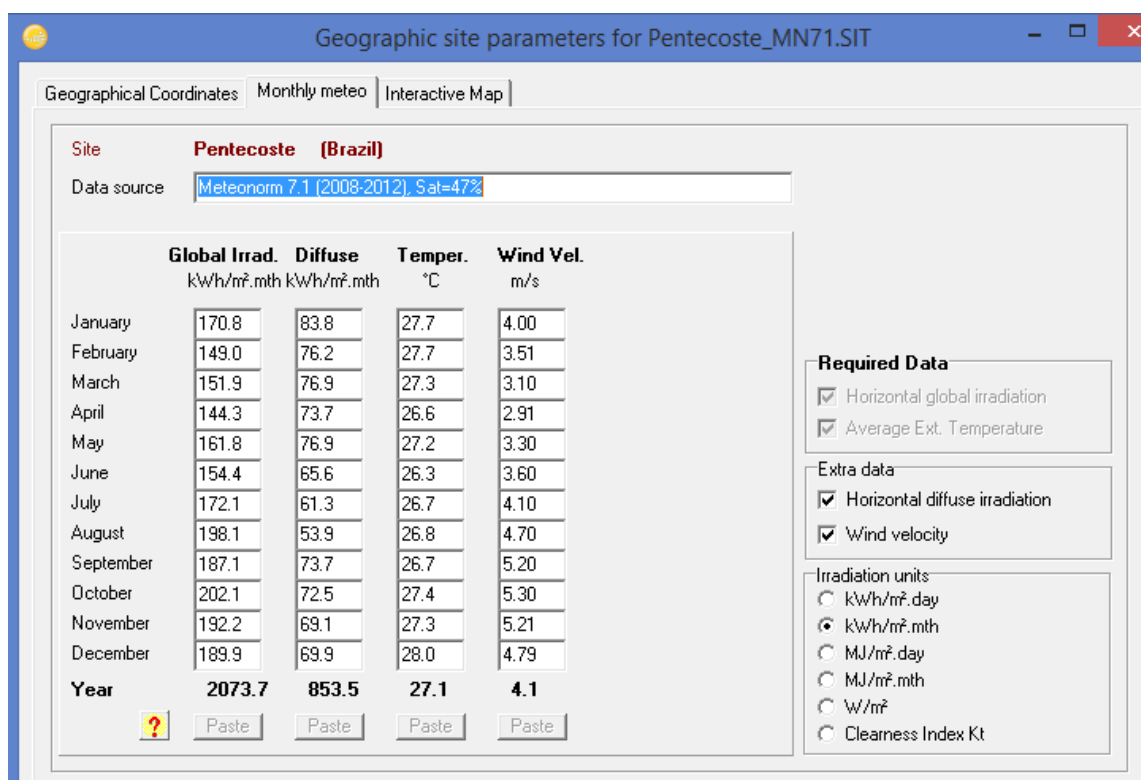
3.1. Obtenção dos Dados Para a Alimentação do Programa

Para a análise deste trabalho, com base em toda a fundamentação teórica apresentada, duas situações para uma usina solar fotovoltaica de grande porte são analisadas: uma utilizando estrutura fixa e outra usando sistema de rastreamento solar. A análise baseou-se nos cálculos e resultados obtidos nas simulações do programa PVsyst.

O principal objetivo deste estudo consiste na comparação dessas duas situações de uma instalação fotovoltaica para uma determinada área e a avaliação do potencial solar da região. Para obtenção dos resultados foi utilizado o software PVsyst, que auxiliou no cálculo da potencial produção anual de energia para a usina, e o software AutoCAD, para o desenvolvimento dos desenhos do layout de acordo com a área útil fornecida e os equipamentos escolhidos. Outras ferramentas utilizadas em conjunto com as acima citadas foram os softwares com Google Earth e com o Global Mapper, para obtenção das imagens das áreas via satélite e para georreferenciar os layouts desenhados no AutoCAD.

Foi utilizada na modelagem do PVsyst os dados climatológicos, referentes as variáveis de temperatura, umidade e radiação, obtidos a partir de uma base de dados virtual Meteororm. Esta base de dados em questão utiliza uma série sintética e virtual de dados construída a partir de valores mensais obtidos de estações meteorológicas próximas ao projeto, portanto, a utilização desta base de dados, permite uma avaliação preliminar, conseqüentemente gerando incertezas ainda aos resultados obtidos do projeto. O local disponível para implantação do projeto estudado no seguinte trabalho encontra-se no interior do Ceará, no município de Pentecoste, e apresenta uma temperatura média de 27,1°C com um quadra chuvosa não muito extensa. Na figura 14, é mostrado uma tela do programa, na qual é informado os dados obtidos pela base de dados Meteororm para o local do projeto. São informados os valores estimados mensais de irradiação global e difusa, temperatura e velocidade do vento.

Figura 15 – Dados gerados pela base de dados Meteonorm para Pentecoste



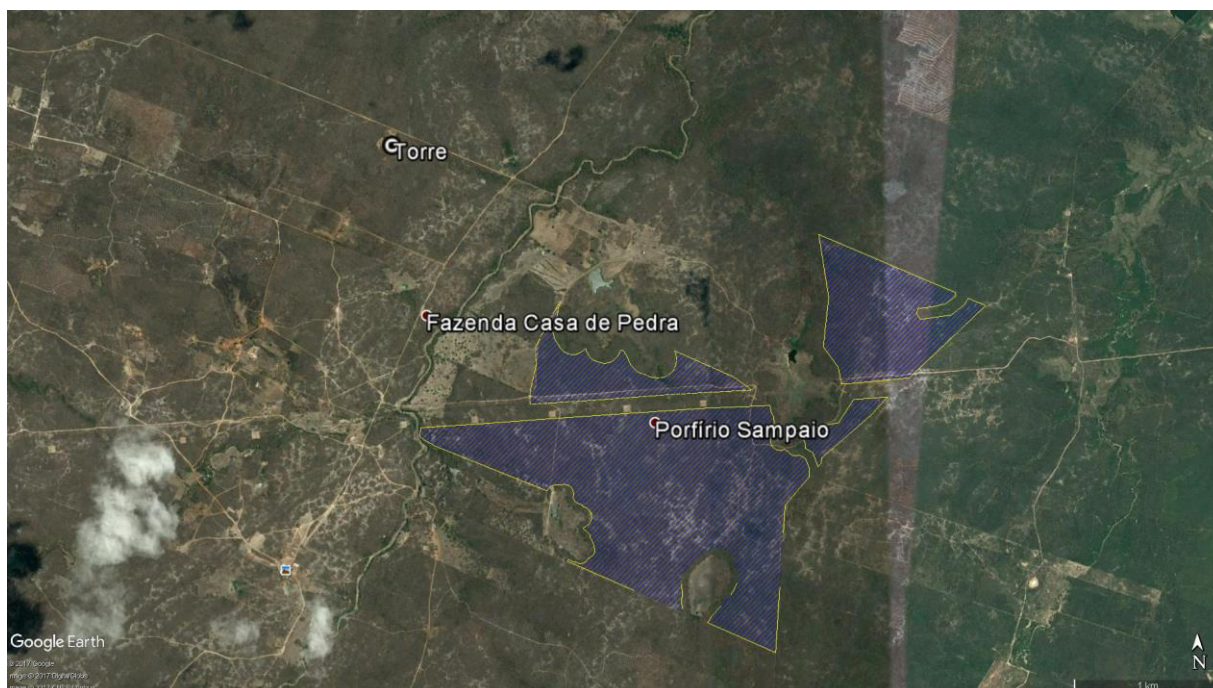
Fonte: Elaborado pelo autor a partir do programa PVsyst.

Para que não haja incertezas, ou para reduzi-las, é recomendado ao projetista realizar o dimensionamento com os dados obtidos após um ano de medição na estação de medição solarimétrica, exigida pela EPE, localizada dentro da área do projeto.

Há de se referir que, ao final de um ano da medição de dados da torre solarimétrica do projeto, os dados resultantes medidos permitirão uma avaliação mais precisa do potencial de radiação solar para a microrregião e possibilitará a obtenção de resultados de produção de energia mais real e com menos incertezas.

A área para implantação do projeto foi fornecida pelo cliente e contempla a área disponível a ser utilizada de 314,55 hectares, em consonância com a avaliação de uso e ocupação do solo sob os aspectos ambientais. Assim, esta área disponível foi importada para o AutoCAD para que fosse avaliado e desenvolvido o layout preliminar de disposição dos equipamentos. Em seguida, após georeferenciar o layout, o arquivo é importado ao Google Earth, com o auxílio do Global Mapper, com o intuito de obter uma visualização mais precisa da área com o desenho do layout inserido a partir de imagem de satélite. Esta área descrita é mostrada na figura 15, onde a área em azul é para a instalação da usina fotovoltaica.

Figura 16 – Área do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Visão Geral Sobre o Software Utilizado (PVSYST)

O software PVsyst é um dos mais completos e populares programas de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos do mercado, sendo de uso genérico e não estando vinculado aos fabricantes de inversores. É uma ferramenta muito utilizada para desenvolver sistemas fotovoltaicos realizando análises detalhadas do desenvolvimento, das simulações e relatando os dados completos dos sistemas.

Ele permite dimensionar o tamanho da instalação tendo em conta a radiação solar com base em sua localização, o que permite o desenho em 3D e levando em consideração a projeção de sombreamentos através de simulação com o movimento do sol durante o dia.

O programa também dispõe da análise econômica utilizando custos reais dos componentes, os custos adicionais e condições de investimento em qualquer moeda. PVsyst é uma ferramenta paga, mas é possível obter gratuitamente por um período de um mês para teste e, em seguida, se não for adquirida uma licença, o usuário terá que utilizá-lo em modo de demonstração.

O programa é comercializado pela PVSYST SA da Suíça, cuja especialidade é o desenvolvimento e distribuição de softwares comerciais para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados, com várias funcionalidades e ferramentas, tais como: simulação de produção de eletricidade, avaliação econômica, pré-dimensionamentos, efeitos de sombreamentos, importação de dados meteorológicos e outras facilidades (SEYR JUNIOR, 2013)

O programa é desenvolvido somente para ambiente MS-Windows e atualmente está em sua versão 6.63 (23/06/2017). O idioma básico é o inglês, porém já possui versões traduzidas para alemão, francês, espanhol e italiano. O tutorial de uso para o software está disponível somente em inglês, sendo composto de 102 páginas em formato pdf, cujo arquivo pode ser descarregado gratuitamente do site do PVsyst. Este documento contém três diferentes tutoriais que descrevem os aspectos básicos da simulação: criação de um projeto conectado à rede, construção e uso de cenários de sombreamento 3D e dados meteorológicos em PVsyst.

Esta versão do programa pode ser descarregada no site www.pvsyst.com e possui um tamanho de cerca de 150 MB. Uma vez instalado, o software irá funcionar no modo *Evaluation*, com todas suas funcionalidades disponíveis pelo período de 30 dias, mas caso o usuário realize impressão de relatórios, os mesmos apresentarão a marca d'água *Evaluation Mode*. Para a execução deste trabalho, o programa foi utilizado no computador pessoal do autor dentro desse período, entre os dias 26 de maio e 25 de junho.

Ao encerrar esse período de teste, o programa passa a funcionar no modo “Demo”, com a perda de praticamente todas suas funcionalidades e limitando a base de dados a poucas localidades. Comprando uma licença, o uso do programa será completo e ilimitado (SEYR JUNIOR, 2013).

3.2.1. Funcionalidades

O programa PVsyst fornece relatórios detalhados, com dados do projeto, gráficos, tabelas e diagramas. Dispõe de uma ferramenta de ajuda que detalha os procedimentos e modelos adotados no programa. Abaixo é listado uma visão geral das aplicações e ferramentas disponíveis no software:

- Projeto preliminar para estudo inicial da instalação com estimativa de produção;
- Desenvolvimento de projeto, com dimensionamento de sistemas conectados à rede, dimensionamento de cabos CC e CA, estudo de perdas de sombreamento, estimativas de perdas e incertezas;
- Possibilidade de importação e exportação de dados de várias fontes diferentes, inclusive de base de dados meteorológicos, como o METEONORM;
- Relatório completo dos resultados, simulando a perda energética e realizando uma análise econômica e uma estimativa de retorno do investidor.

O programa possui três opções de análise do sistema fotovoltaico, que correspondem aproximadamente às diversas etapas de desenvolvimento do projeto: projeto preliminar, elaboração do projeto, análise dos dados medidos.

O “projeto preliminar” é a etapa de pré-dimensionamento de um projeto fotovoltaico, em que ocorre uma estimativa grosseira da produção de energia no sistema durante uma avaliação inicial de um *site*. Apenas alguns parâmetros ou características gerais do sistema são utilizados, sem especificar os seus componentes reais, como os modelos de módulos fotovoltaicos e inversores.

A opção “elaboração do projeto” é para a realização de um projeto fotovoltaico completo, em que diferentes simulações no sistema são feitas, permitindo uma análise comparativa ao final do dimensionamento. A performance do sistema é simulada na produção detalhada por hora, que fornece resultados mais realistas. Deve ser informada a orientação (azimute), a inclinação dos módulos fotovoltaicos, o tipo de montagem e realizar a escolha dos componentes específicos do sistema, tais como: modelo e quantidade de módulos fotovoltaicos e o modelo de inversor. Em um segundo passo, o usuário pode especificar parâmetros mais detalhados e fazer uma análise apurada do seu comportamento térmico, do cabeamento elétrico da instalação, da qualidade do módulo, das incompatibilidades e perdas devido ao ângulo de incidência, dos sombreamentos na linha do horizonte e por objetos próximos, permitindo ainda outros detalhamentos. Foi a partir deste item do programa que o presente trabalho foi abordado.

A opção “análise dos dados medidos” nada mais é que uma ferramenta de avaliação posterior à instalação do sistema fotovoltaico, que utiliza dados reais da produção para exibir tabelas e gráficos da sua performance real, além de realizar comparações com

variáveis simuladas para aprimorar o seu funcionamento, permitindo a constatação e identificação do menor mau funcionamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, os resultados da análise comparativa dos ganhos de captação de irradiação solar são apresentados, proporcionados com o uso de estrutura fixa e com o uso de sistemas de seguimento solar em uma usina solar fotovoltaica de grande porte (150 MW). A comparação é feita detalhando para cada situação os parâmetros de saída como rendimento, fator de capacidade e perdas estimadas.

Para o dimensionamento de uma usina fotovoltaica, é necessário a análise dos parâmetros como dimensão do módulo fotovoltaico, inclinação dos módulos, declividade do terreno, hidrográfica, áreas de reservas ambientais, tamanho das vias internas.

4.1. Metodologia de Cálculos – PVSYS

O projeto foi dimensionado a partir do valor preestabelecido de potência instalada pico de 150 MW. Para isso, os modelos de inversor e dos módulos fotovoltaicos foram escolhidos com base na adequabilidade dos mesmos às condições locais de clima, dimensões e padronizações de operação com efeito de longo prazo, considerando instalações de grande porte e ainda a possibilidade de expansões futuras. A partir de suas especificações, foi calculado as estimativas de produção anual de energia, tendo como premissas técnicas as variáveis de tensão e corrente com otimização de perdas elétricas. Os equipamentos escolhidos estão listados na tabela abaixo:

Tabela 1 – Equipamentos escolhidos para o dimensionamento no PVsyst

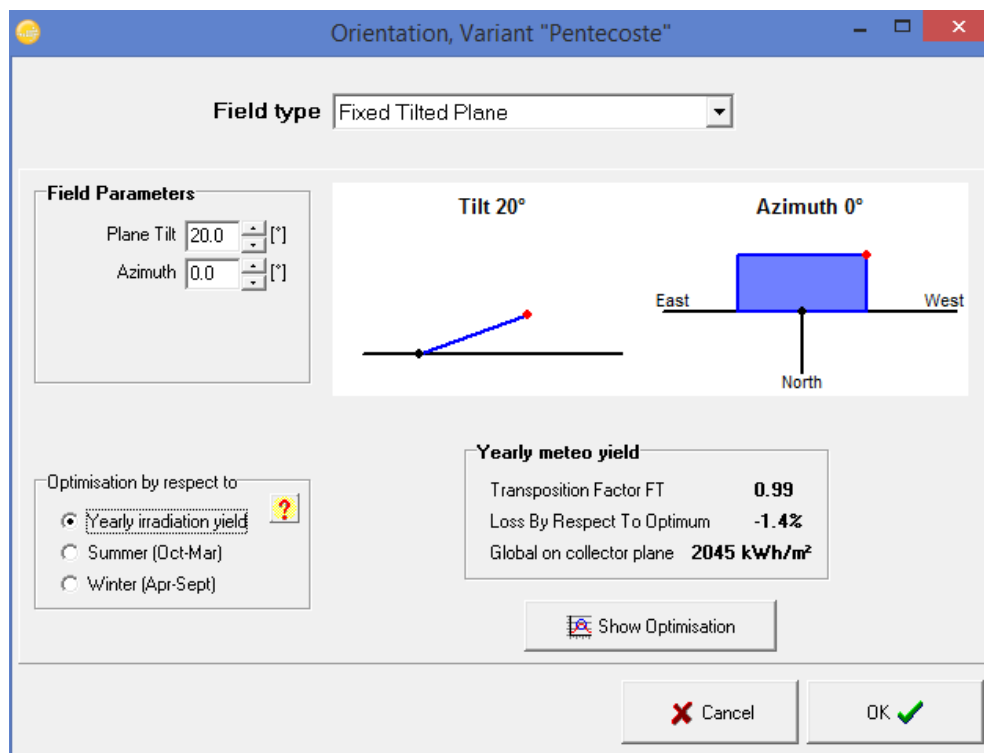
EQUIPAMENTO	FABRICANTE	MODELO	POTÊNCIA
Módulo Fotovoltaico	Canadian Solar	MAXPOWER (1500 V) CS6U-320P	320 Wp
Inversor	ABB	ULTRA-1500-TL-OUTD-X-US-690	1500 kW

Fonte: Elaborada pelo autor.

O cálculo foi feito através do software PVsyst e para cada simulação, um relatório detalhado é gerado apresentando as perdas e ganhos em cada situação.

O primeiro passo é a definição da orientação dos módulos, em que o tipo de estrutura é escolhido (estrutura fixa ou sistema de rastreamento solar) e para cada estrutura, o usuário pode configurar os detalhes, como inclinação dos módulos em relação ao solo (*tilt*) e o ângulo azimute. A figura 16 mostra essa tela de configuração.

Figura 17 – Tela de configuração para a orientação dos módulos



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do programa PVsyst.

O passo seguinte é a etapa de definição dos componentes do sistema, onde são escolhidos os modelos dos módulos e inversores, informados na Tabela 1, bem como a quantidade de strings do sistema. Para melhor entendimento, a figura 17 mostra a janela desta etapa.

Figura 18 – Definição dos componentes do sistema

The screenshot displays the 'Global System configuration' window in PVsyst. It is divided into several sections:

- Global System configuration:** Includes a dropdown for 'Number of kinds of sub-arrays' (set to 1) and a 'Simplified Schema' button.
- Global system summary:** A table showing:

Nb. of modules	540000	Nominal PV Power	172800 kWp
Module area	1049933 m²	Maximum PV Power	0.0 kWdc
Nb. of inverters	100	Nominal AC Power	150000 kWac
- PV GIRASOL (Sub-array name and Orientation):** Name is 'PV GIRASOL', Orientation is 'Tracking tilted or horiz. N-S axis'.
- Presizing Help:** Radio buttons for 'No sizing' (selected) and 'Enter planned power' (172800 kWp) or '... or available area(modules)' (1049933 m²).
- Select the PV module:** Shows 'Canadian Solar Inc.' 320 Wp 31V Si-poly CS6U - 320P 1500V Since 2016. Sizing voltages: Vmpp (60°C) 31.4 V, Voc (23°C) 45.6 V.
- Select the inverter:** Shows 'ABB' 1500 kW 470 - 900 V 60 Hz ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M Since 2013. Nb. of inverters: 100. Operating Voltage: 470-900 V, Input maximum voltage: 1000 V, Global Inverter's power: 150000 kWac.
- Design the array:**
 - Number of modules and strings:** Mod. in series: 20, Nbre strings: 27000. Overload loss: 0.3%, Pnom ratio: 1.15.
 - Operating conditions:** Vmpp (60°C) 627 V, Vmpp (23°C) 742 V, Voc (23°C) 912 V.
 - Plane irradiance:** 1000 W/m².
 - Max. operating power:** 154937 kW at 1000 W/m² and 50°C.
 - Array nom. Power (STC):** 172800 kWp.

Buttons at the bottom include 'System overview', 'Cancel', and 'OK'.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do programa PVsyst.

O terceiro passo é realizar o detalhamento das perdas do sistema. Foi considerado para a estimativa final de produção algumas perdas associadas aos equipamentos utilizados. Dentre essas perdas, as principais são:

a) *Thermal parameter*: Definidas como as perdas por temperatura, visto que os painéis tendem a perder sua eficiência conforme a temperatura aumenta. Os valores considerados estão associados à montagem dos módulos fotovoltaicos, quando há circulação de ar, dutos de ar ou isolamento da parte de trás do módulo. Para o caso desse trabalho, foi considerado a opção com circulação de ar.

b) *Ohmic Losses*: Definida como perdas causadas pela diferença de operação do módulo em relação às condições padrão (1000W/m², 25°C).

c) *Module Quality*: É uma perda que tem relação com o desempenho real do módulo. Definida pelo usuário do PVsyst e baseia-se na tolerância inferior do módulo. Assemelha-se a um fator de segurança para a produção final, uma diminuição na incerteza, com essa ferramenta ajusta-se o real comportamento do módulo no projeto.

d) *LID*: Representa a perda de performance nas primeiras horas de exposição ao Sol e também está relacionada com o painel utilizado. Geralmente essas perdas ficam na ordem de 1 a 3%.

e) *Mismatch*: Está relacionado com a disposição em séries dos módulos, onde muitas vezes a corrente mais baixa de um módulo vai influenciar a corrente de toda a sequência.

f) *Soiling Losses*: Definido como as perdas associadas à sujidade dos painéis. Essas perdas estão relacionadas, principalmente, ao ambiente em questão. O acúmulo de sujidade no painel atua diretamente sobre o desempenho deste e é um fator de incerteza também relacionado ao ambiente.

g) *IAM Losses*: Definido como perdas causadas pela diminuição da irradiação que, de fato, chega ao painel, devido a sua angulação em relação à normal.

Para a usina solar em questão, foram realizados dois tipos de testes bem específicos, com o objetivo de avaliar o melhor aproveitamento do recurso e assim ter o melhor ganho em produção e as menores perdas possíveis. Nesses testes, é possível avaliar a aplicabilidade de sistema de rastreamento solar (*trackers*) baseando-se no ganho da captação da radiação no plano dos coletores.

Os cálculos de perdas relacionados aos cabeamentos não foram contabilizados, pois são realizados a partir de uma primeira estimativa real de produção de energia, já com o uso dos dados reais medidos na estação solarimétrica em operação, sendo portanto ao final de um ano de medições.

Por último, deve-se realizar a análise de sombreamento do sistema. Para isso, é necessário construir um desenho da usina no programa, para fins de perspectiva de sombreamento entre os módulos. Na figura 18, a janela dessa ferramenta é mostrada. Para fazer o desenho do layout, deve-se clicar na opção “*Construction / Perspective*”.

Figura 19 – Análise de sombreamento

Comment: PVObject_Ombrage=pvShading

Compatibility with Orientation and System parameter	
	Orient./System
Active area	1049933 m ²
Fields tilt	Tracking
Fields azimuth	tilted axis

Shadings: 1053000 m²

Tracking tilted axis

Information

Use in simulation

No Shadings

Linear shadings

According to module strings

Fraction for electrical effect: 100.0 %

Calculation mode

Fast (table)

Slow (simul.)

Detailed, according to Module Layout

Buttons: Construction / Perspective, Shading Factor tables (Table, Graph), System overview, Print, Model library (Open, Save), Cancel, OK.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do programa PVsyst.

4.2. Análise dos Ganhos de Captação de Irradiância Solar Com o Uso de *Trackers* – Aplicação e Resultados

Após a definição da orientação dos módulos, dos componentes do sistema, da estimativa detalhada das perdas e feito a análise de sombreamento no sistema, a simulação é realizada, gerando os resultados em forma de relatórios.

Os resultados incluem dezenas de variáveis, que podem ser exibidas em valores mensais, diários ou horários. Para cada simulação realizada, um relatório pode ser impresso, exibindo os parâmetros usados e os principais resultados obtidos. A ferramenta "diagrama de perdas" possui um grande valor ao usuário, pois a partir dela, é possível identificar os pontos fracos do projeto do sistema fotovoltaico dimensionado. Uma avaliação financeira detalhada pode ainda ser feita, utilizando preços de mercado dos componentes, custos adicionais e condições do investimento.

Os relatórios apresentam detalhadamente os dados iniciais da usina, tais como coordenadas geográficas, incidência solar no local a partir dos dados virtuais Meteonorm e os equipamentos – módulos e inversor – escolhidos para compor as instalações, as características de sombreamento para a área escolhida, as estimativas de produção de energia e as perdas no sistema.

Assim, duas simulações para a mesma usina solar fotovoltaica, com capacidade de geração de 150 MW (pico), foram elaboradas para fins de comparação: uma com o uso de estruturas de fixação ao solo e outra com o uso de um plano de rastreamento solar. Os parâmetros de simulação eram iguais e são apresentados na tabela 2. Os relatórios para cada simulação encontram-se anexados ao trabalho para possíveis referências.

Tabela 2 – Parâmetros de simulação

Localização	
Pentecoste/CE	Latitude: -3,70° S
	Longitude: -39,10° O
Dados Gerais	
Albedo	0,20
Perdas de sujidade	3,0 %
Fator de perda térmica	29 W/m ² .K
Perdas por cabeamento	0,054 mOhm
Perdas por qualidade do módulo	-2,5 %
Perdas por LID (sigla do inglês – degradação induzida pela luz)	1,5 %
Perdas de incompatibilidade do módulo	1,0%
Módulo Fotovoltaico	
Potência	320 Wp
Número de módulos em série (String)	21

Quantidade de módulos por mesa	42
Quantidade de módulos na usina	541.800
Inversor	
Potência	1500 kW
Quantidade de inversores	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1. Usina com Estrutura Fixa

Para a usina com estrutura fixa, foi adotado um ângulo de inclinação de 15° em relação ao solo para os módulos. Assim, os resultados de produção são obtidos:

Tabela 3 – Principais resultados para a usina com estrutura fixa

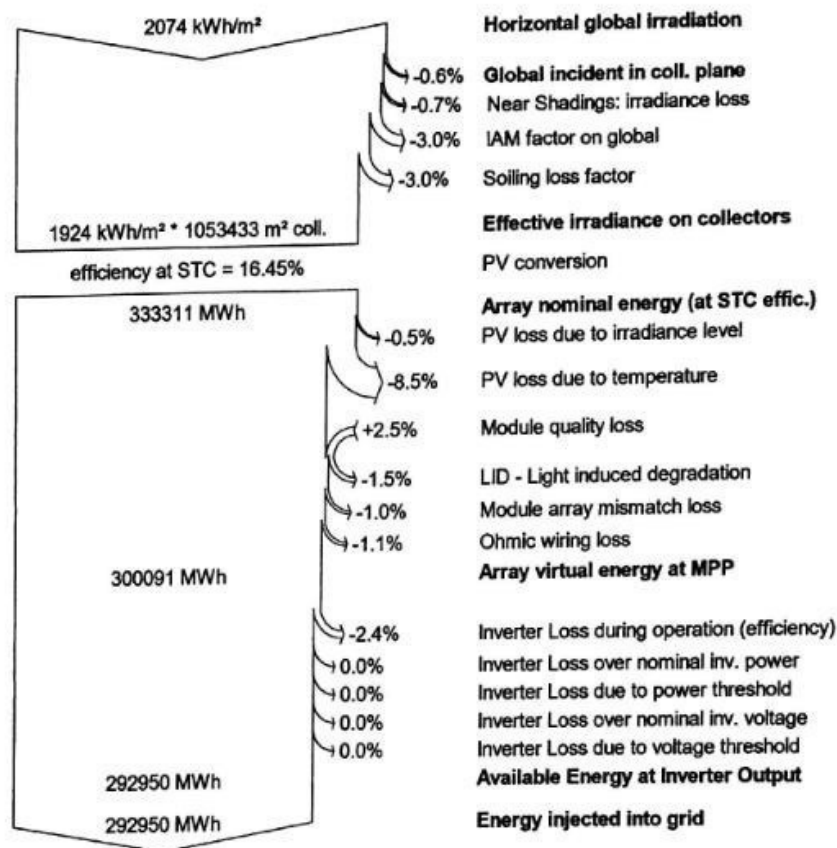
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	170.8	83.76	27.72	154.0	142.5	22354	21829	0.817
February	149.0	76.22	27.66	139.9	129.8	20316	19829	0.818
March	151.9	76.87	27.31	149.5	139.2	21711	21188	0.817
April	144.3	73.68	26.56	148.4	138.5	21661	21147	0.822
May	161.8	76.91	27.18	175.2	163.8	25629	25035	0.824
June	154.4	65.63	26.26	171.0	160.2	25135	24549	0.828
July	172.1	61.27	26.69	191.1	179.3	27977	27315	0.824
August	198.1	53.87	26.83	211.4	199.0	30717	29971	0.818
September	187.1	73.70	26.74	187.8	175.7	27359	26711	0.820
October	202.1	72.47	27.40	192.3	179.7	27881	27205	0.816
November	192.2	69.14	27.32	173.3	161.1	25164	24557	0.817
December	189.9	69.88	28.02	167.1	154.7	24184	23613	0.815
Year	2073.8	853.41	27.14	2061.2	1923.7	300088	292950	0.820

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do PVsyst.

A figura 17 mostra os valores mensais de irradiação horizontal global e difusa (“GlobHor” e “DiffHor”, respectivamente); temperatura ambiente (“T Amb”); irradiação incidente no plano do coletor e efetiva global (“GlobInc” e “GlobEff”, respectivamente); energia efetiva na saída (“EArray”); energia injetada à rede (“E_grid”); e a taxa de desempenho “PR” (sigla em inglês – *Performance Ratio*).

A partir da análise das perdas no sistema, ilustrada na figura 19, é possível determinar quais fatores influenciam positivamente ou negativamente a usina no decorrer de um ano. Por exemplo, nesse caso, a temperatura é o fator que mais afeta o sistema, causando uma perda de 8,5% (*PV loss due to temperature*).

Figura 20 – Diagrama de perdas no decorrer de um ano para uma usina com estrutura fixa



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do PVsyst

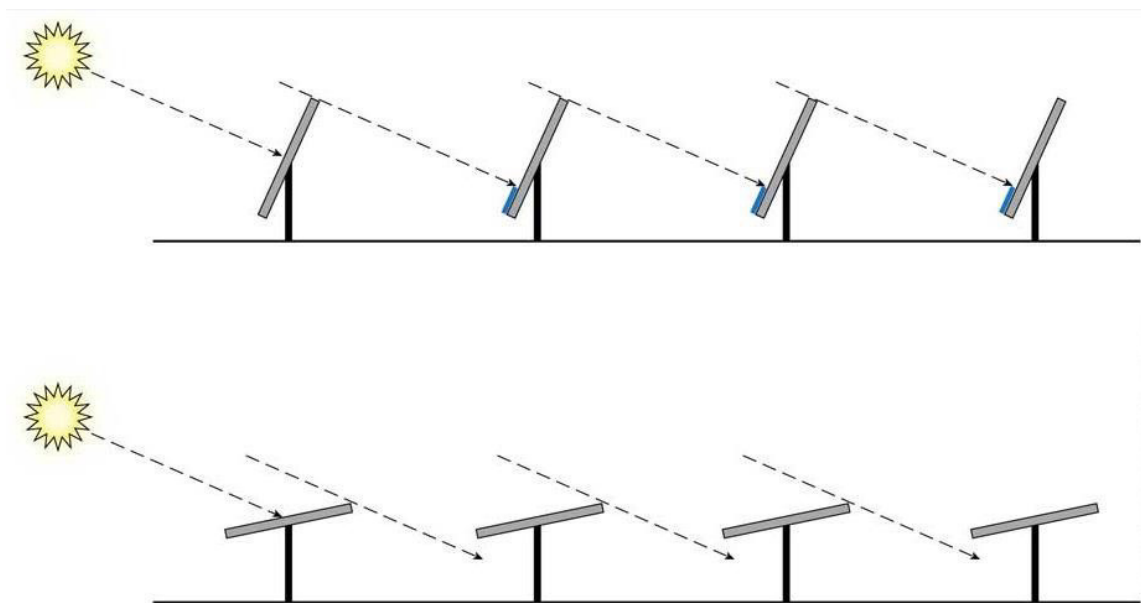
Assim, pode-se observar que para a usina fotovoltaica em análise, com estrutura fixa, 292.950 MWh é gerado para o período de um ano. Sendo assim, ao dividir esse valor de energia por 150 MW, que é a potência instalada da usina, vezes 8.760 horas, que é a quantidade de horas em um ano), é determinado o fator de capacidade da usina, que é o percentual do tempo no qual a mesma operou a plena carga, sendo igual a 0,223 ou 22,3%.

4.2.2. Usina com Sistema de Rastreamento Solar

O sistema de *trackers* adotado para esta situação foi o seguidor de eixo único norte-sul (N-S), por ser mais adequado para baixas latitudes e por ser mais eficiente para projetos de grande porte, quando comparado a *trackers* de dois eixos.

O projeto da usina com o uso de *trackers* foi dimensionado para utilizar estratégia de “*backtracking*”, que faz com que a orientação dos módulos não permita sombreamento nos horários em que o Sol está mais próximo do horizonte, no nascer ou no pôr do sol, conforme mostra a figura 20. Essa estratégia evita que haja perdas elétricas no sistema e mantém o rendimento similar com o restante do dia (NASCIMENTO; ALBUQUERQUE; LIMA; SOUSA, 2015).

Figura 21 – Estratégia de *Backtracking*



Fonte: Solar Profissional.

A tabela 4 mostra os saldos e principais resultados, em valores mensais, para a usina, de forma semelhante à tabela 3.

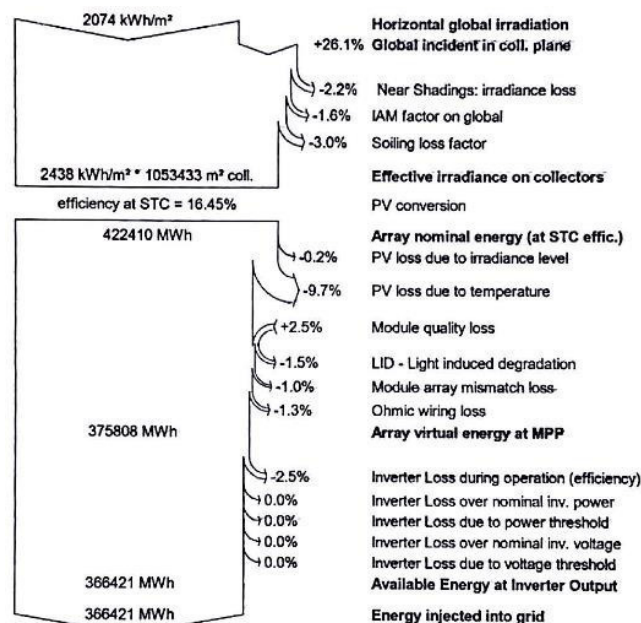
Tabela 4 – Principais resultados para a usina com sistema de rastreamento solar

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	170.8	83.76	27.72	209.5	194.4	29939	29204	0.804
February	149.0	76.22	27.66	181.8	168.6	25969	25324	0.804
March	151.9	76.87	27.31	185.7	172.4	26454	25793	0.801
April	144.3	73.68	26.56	175.6	162.8	25234	24616	0.809
May	161.8	76.91	27.18	202.1	187.5	29249	28564	0.815
June	154.4	65.63	26.26	194.3	180.6	28300	27838	0.820
July	172.1	61.27	26.69	224.5	209.5	32593	31813	0.817
August	198.1	53.87	26.83	260.4	244.7	37492	36554	0.810
September	187.1	73.70	26.74	239.0	223.2	34341	33494	0.808
October	202.1	72.47	27.40	256.9	240.5	36659	35729	0.802
November	192.2	69.14	27.32	244.7	228.8	35004	34114	0.804
December	189.9	69.88	28.02	241.1	224.9	34437	33577	0.803
Year	2073.8	853.41	27.14	2615.6	2438.0	375672	366421	0.808

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do PVsyst.

Em seguida, na figura 21, o diagrama de perdas para esta situação é apresentado. Através dele é possível verificar um ganho significativo de 26,1% no sistema, causados pela maior irradiação incidente global no plano dos coletores. Ao comparar com a figura 19, há um aumento de perda por temperatura (9,7%) e um ganho considerável de energia produzida.

Figura 22 – Diagrama de perdas no decorrer de um ano para uma usina com trackers de eixo único N-S



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do PVsyst.

Portanto, para a usina fotovoltaica analisada, é produzido 366.421 MWh de energia no decorrer de um ano. Com isso, realizando o cálculo de fator de capacidade de forma análoga como feito no tópico anterior, é obtido um valor de 0,279 ou 27,9%.

Assim, para efeitos de comparação, fica evidente um ganho significativo de produção de energia na usina com a utilização de um sistema simples de rastreamento solar.

5. CONCLUSÃO

A partir da fundamentação teórica apresentada, é possível constatar a variedade de alternativas em que pode ser constituído um sistema de rastreamento solar e as diferentes maneiras de se realizar o acompanhamento do Sol, tendo em vista que resultados consideráveis foram obtidos com o uso desta tecnologia por diversos pesquisadores em diferentes países ao redor do mundo. Ocorreu também uma melhor compreensão de alguns aspectos importantes relacionados ao uso de *trackers*, tais como tipos de rastreadores existentes e tipos de sistemas de controle de seguimento possíveis.

Com a realização do presente trabalho de conclusão de curso, é possível constatar que o uso de sistema de rastreamento solar pode ser uma boa alternativa quando se deseja aumentar a eficiência na captação de energia solar por parte de um sistema fotovoltaico, pois muitas vezes com mecanismos e dispositivos simples, e pequenos investimentos, se consegue obter ganhos consideráveis na energia solar captada pelo sistema. Como está havendo no país um acentuado aumento de investimentos no ramo de energia fotovoltaica e o aumento de seu uso como fonte alternativa de energia, fica evidente a importância do desenvolvimento deste tipo de tecnologia que proporciona um aumento significativo de eficiência do sistema.

A partir dos diagramas de perdas de cada simulação feita no programa PVsyst, pode-se observar que, com o uso de sistema de rastreamento solar, o aproveitamento da radiação teve um aumento de cerca de 26% em relação ao uso de coletores solares fixos. Além disso, foi constatado um aumento considerável no fator de capacidade para a simulação com *trackers*. Isso pode implicar no aumento do custo do projeto, mas também representa um ganho na produção final da usina.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode ser indicado uma avaliação da viabilidade econômica considerando a relação entre o ganho de produção pelo uso de sistema de rastreadores solares e os custos de operação e manutenção dos mesmos.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S. The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. **Energy Conversion and Management**, 2004, v. 45, p. 1671-1679.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**. São Paulo, 2012

BRAGA, Renato Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. 2008. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. **Solar Energy**, 2004, v. 77, p. 270-275.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia Solar – Princípios e Aplicações**, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 24 de junho 2017.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. **Planning and Installing Photovoltaic Systems**. Earthscan. 2.ed. Berlin, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Expansão da Geração: Empreendimentos Fotovoltaicos**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2015.

FOSTER, R.; GHASSEMI, M; COTA, A. **Solar energy: renewable energy and the environment**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

GIL, Francisco J. Gómez *et al.* **A review of solar tracker patents in Spain**. In: WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY SOURCES, 3., 2009, Tenerife-Espanha, p. 292–297.

HERZOG, O.; HERZOG, S. 2017. **Apostila do Curso - Projeto de Usinas Fotovoltaicas de Minigeração e Grande Porte**. Recife, Brasil: Solarize. 2017.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION. **Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants: A project developer's guide**. 2121 Pennsylvania Avenue, N.W. Washington D.C., 2015.

MAXIMIZING your Solar Energy Output with a Solar Tracker, **Solar Energy for Homes**. EUA. Disponível em: <<http://www.solar-energy-for-homes.com/solar-tracker.html>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

NASCIMENTO, B.; ALBUQUERQUE, D.; LIMA, M.; SOUSA, P. Backtracking Algorithm for Single-Axis Solar Trackers installed in a sloping field. **International Journal of Engineering Research and Applications**. Viseu, Portugal, v. 5, p. 100-103, dez. 2015.

Curso de Astronomia – Parte 2. **Nave Astro**. Brasil. Disponível em: <http://www.naveastro.com/astronomia/curso/parte_2.html>. Acesso em: 06 jun. 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Revisada. Rio de Janeiro, 2014

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. 2. ed. São Paulo: Hemus, 2005.

PV Trackers, **Solar Professional**. EUA. Disponível em: <<http://solarprofessional.com/articles/productsequipment/racking/pvtrackers#.WWsou4TyvI>>. Acesso em 03 jul. 2017.

ROCHA FILHO, José Itanor do Couto. **Potencial do Uso de Seguimento Solar em Sistemas Fotovoltaicos: Estudo de Caso para Fortaleza/CE**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RIBEIRO, S. C.; LEITE DO PRADO, P. P.; GONÇALVES, J. B. **Projeto e Desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos**. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 9., 2012, Resende. **Anais...** Rio de Janeiro: Gestão, Inovação e Tecnologia para a Sustentabilidade, 2012, p. 2-10.

SEYR JUNIOR, U. **Avaliação de Programas Computacionais para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2013. Monografia (Especialização em Eficiência Energética) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SOUZA, R. di. **Introdução a Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. Ribeirão Preto: Blue Sol Energia Solar, 2014.

SEGUIDOR Solar – Tracker: Vantagens e Desvantagens Parte 1. **Portal Solar**. Brasil. Disponível em: <www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar---tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>. Acesso em: 28 jun. 2017.

VÉRAS, Paulo Claudino. **Estudo dos benefícios e proposta de um modelo de controle de um rastreador solar ativo**. 2004. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2004.

APÊNDICE A – RELATÓRIO ESTRUTURA FIXA

PVSYST V6.63		04/07/17	Page 1/4
Grid-Connected System: Simulation parameters			
Project :			
Geographical Site	Pentecoste	Country	Brazil
Situation	Latitude	Longitude	-39.10° W
Time defined as	Legal Time	Altitude	58 m
	Albedo		0.20
Meteo data:	Pentecoste	Meteonorm 7.1 (2008-2012), Sat=47% - Synthetic	
Simulation variant : T2			
	Simulation date	02/06/17 15h02 (version 6.62)	
Simulation parameters			
Collector Plane Orientation	Tilt	15°	Azimuth 0°
Models used	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteonorm
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	Linear shadings		
PV Array Characteristics			
PV module	Si-poly	Model	CS6U - 320P 1500V
Original PVsyst database	Manufacturer	Canadian Solar Inc.	
Number of PV modules	In series	21 modules	In parallel 25800 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	541800	Unit Nom. Power 320 Wp
Array global power	Nominal (STC)	173376 kWp	At operating cond. 155453 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	691 V	I mpp 225098 A
Total area	Module area	1053433 m²	Cell area 949494 m²
Inverter			
Original PVsyst database	Model	ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA	
Characteristics	Manufacturer	ABB	
	Operating Voltage	470-900 V	Unit Nom. Power 1500 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	100 units	Total Power 150000 kWac
PV Array loss factors			
Array Soiling Losses		Loss Fraction	3.0 %
Thermal Loss factor	Uc (const)	29.0 W/m²K	Uv (wind) 0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	0.054 mOhm	Loss Fraction 1.6 % at STC
LID - Light Induced Degradation			Loss Fraction 1.5 %
Module Quality Loss			Loss Fraction -2.5 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param.	0.05
User's needs :	Unlimited load (grid)		

Grid-Connected System: Near shading definition

Project :

Simulation variant : T2

Main system parameters

System type **Grid-Connected**

Near Shadings

PV Field Orientation

Linear shadings

PV modules

Model CS6U - 320P 1500V

tilt 15° azimuth 0°

PV Array

Nb. of modules 541800

Pnom 320 Wp

Inverter

ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA

Pnom total 173376 kWp

Inverter pack

Nb. of units 100.0

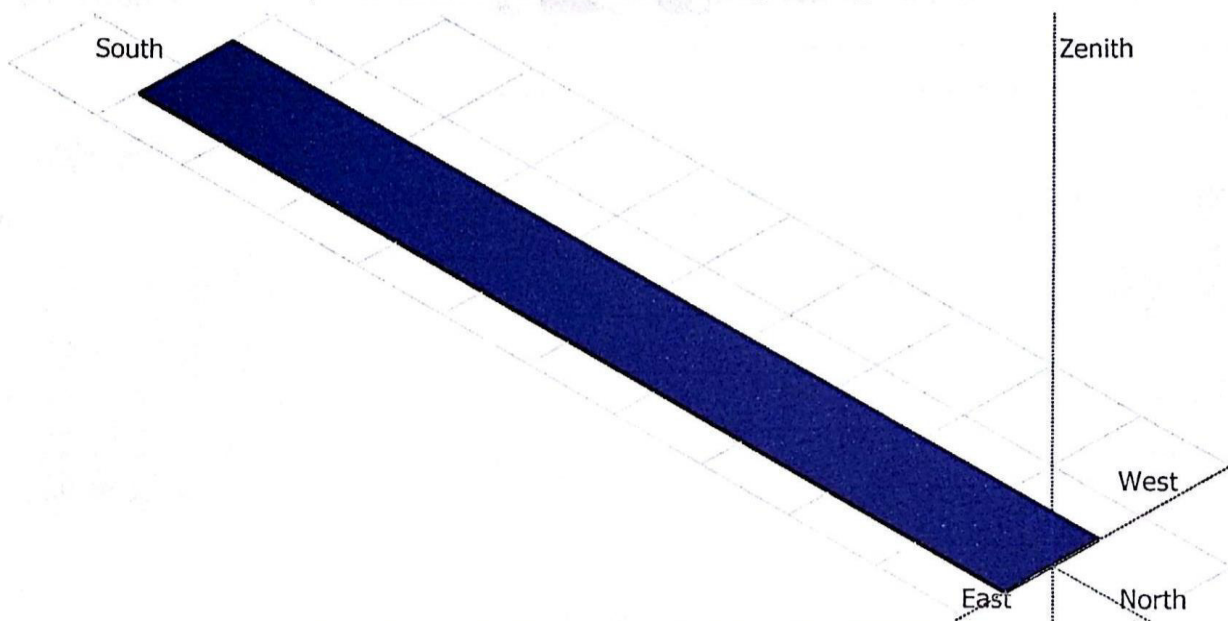
Pnom 1500 kW ac

User's needs

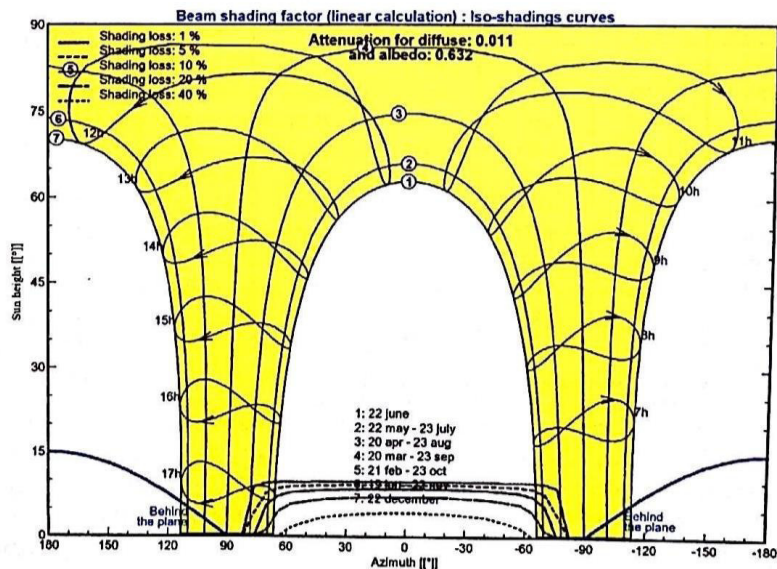
Unlimited load (grid)

Pnom total 150000 kW ac

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram



Grid-Connected System: Main results

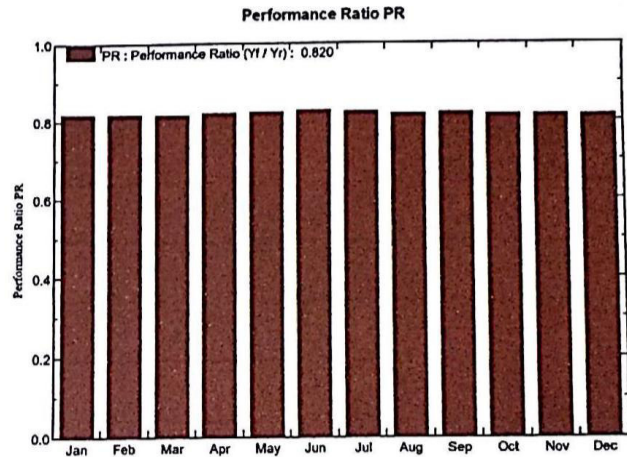
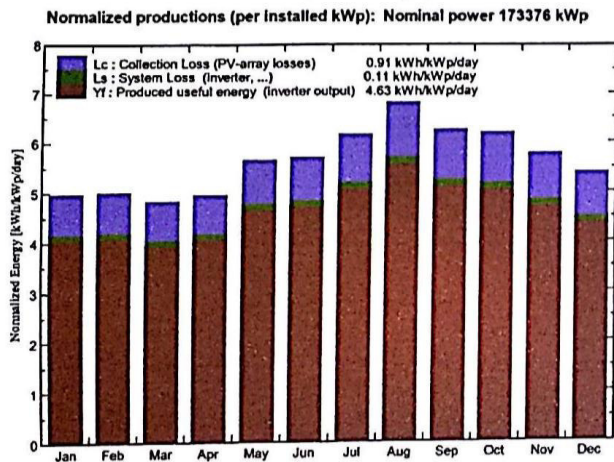
Project :

Simulation variant : T2

Main system parameters	System type Grid-Connected
Near Shadings	Linear shadings
PV Field Orientation	tilt 15° azimuth 0°
PV modules	Model CS6U - 320P 1500V Pnom 320 Wp
PV Array	Nb. of modules 541800 Pnom total 173376 kWp
Inverter	ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA Pnom 1500 kW ac
Inverter pack	Nb. of units 100.0 Pnom total 150000 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)

Main simulation results

System Production	Produced Energy 292950 MWh/year	Specific prod. 1690 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR 81.98 %	



T2

Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	170.8	83.76	27.72	154.0	142.5	22354	21829	0.817
February	149.0	76.22	27.66	139.9	129.8	20316	19829	0.818
March	151.9	76.87	27.31	149.5	139.2	21711	21188	0.817
April	144.3	73.68	26.56	148.4	138.5	21661	21147	0.822
May	161.8	76.91	27.18	175.2	163.8	25629	25035	0.824
June	154.4	65.63	26.26	171.0	160.2	25135	24549	0.828
July	172.1	61.27	26.69	191.1	179.3	27977	27315	0.824
August	198.1	53.87	26.83	211.4	199.0	30717	29971	0.818
September	187.1	73.70	26.74	187.8	175.7	27359	26711	0.820
October	202.1	72.47	27.40	192.3	179.7	27881	27205	0.816
November	192.2	69.14	27.32	173.3	161.1	25164	24557	0.817
December	189.9	69.88	28.02	167.1	154.7	24184	23613	0.815
Year	2073.8	853.41	27.14	2061.2	1923.7	300088	292950	0.820

Legends:	GlobHor	Horizontal global irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
	DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
	T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
	GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

Grid-Connected System: Loss diagram

Project :

Simulation variant : T2

Main system parameters

System type **Grid-Connected**

Near Shadings

Linear shadings

PV Field Orientation

tilt 15°

azimuth 0°

PV modules

Model CS6U - 320P 1500V

Pnom 320 Wp

PV Array

Nb. of modules 541800

Pnom total 173376 kWp

Inverter

ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA

Pnom 1500 kW ac

Inverter pack

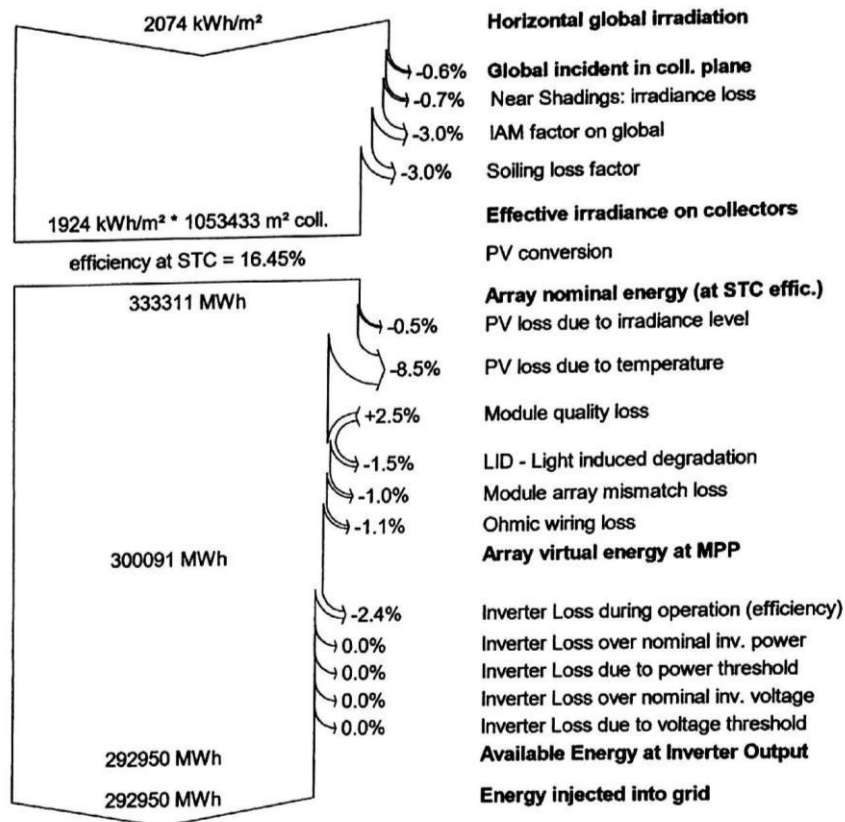
Nb. of units 100.0

Pnom total 150000 kW ac

User's needs

Unlimited load (grid)

Loss diagram over the whole year



APÊNDICE B – RELATÓRIO TRACKERS DE 1 EIXO N-S

PVSYST V6.62		26/05/17	Page 1/4
Grid-Connected System: Simulation parameters			
Project :	Pentecoste		
Geographical Site	Pentecoste	Country	Brazil
Situation	Latitude	Longitude	-3.70° S -39.10° W
Time defined as	Legal Time	Altitude	Time zone UT-3 58 m
	Albedo		0.20
Meteo data:	Pentecoste	Meteonorm 7.1 (2008-2012), Sat=47% - Synthetic	
Simulation variant :	New simulation variant		
	Simulation date	26/05/17 18h26	
Simulation parameters			
Tracking plane, tilted Axis	Axis Tilt	Axis Azimuth	0°
Rotation Limitations	Minimum Phi	Maximum Phi	-60° 60°
Backtracking strategy	Tracker Spacing	Collector width	7.00 m 1.98 m
Inactive band	Left	Right	0.02 m 0.02 m
Models used	Transposition	Diffuse	Perez Perez, Meteonorm
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	Linear shadings		
PV Array Characteristics			
PV module	Si-poly	Model	CS6U - 320P 1500V
Original PVsyst database	Manufacturer	Canadian Solar Inc.	
Number of PV modules	In series	21 modules	In parallel 25800 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	541800	Unit Nom. Power 320 Wp
Array global power	Nominal (STC)	173376 kWp	At operating cond. 155453 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	691 V	I mpp 225098 A
Total area	Module area	1053433 m²	Cell area 949494 m²
Inverter			
Original PVsyst database	Model	ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA	
Characteristics	Manufacturer	ABB	
	Operating Voltage	470-900 V	Unit Nom. Power 1500 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	100 units	Total Power 150000 kWac
PV Array loss factors			
Array Soiling Losses		Loss Fraction	3.0 %
Thermal Loss factor	Uc (const)	29.0 W/m²K	Uv (wind) 0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	0.054 mOhm	Loss Fraction 1.6 % at STC
LID - Light Induced Degradation			Loss Fraction 1.5 %
Module Quality Loss			Loss Fraction -2.5 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param. 0.05
User's needs :	Unlimited load (grid)		

Grid-Connected System: Near shading definition

Project :

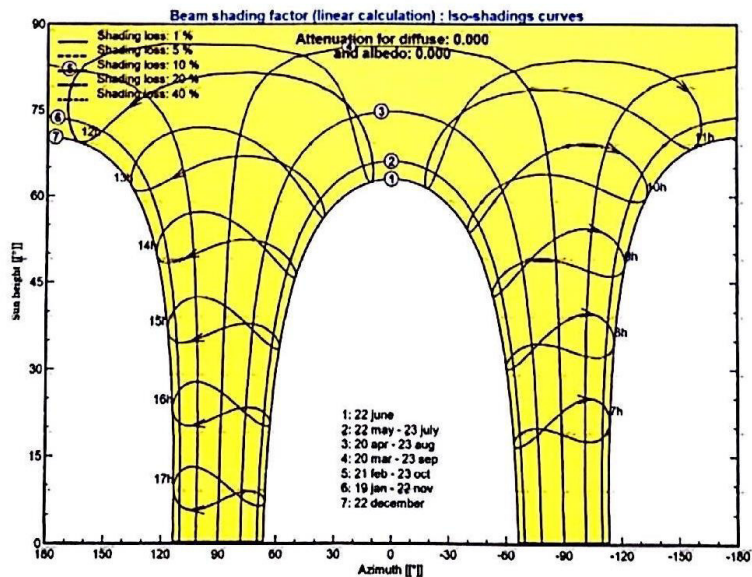
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type Grid-Connected	
Near Shadings	Linear shadings	
PV Field Orientation	tracking, tilted axis, Axis Tilt	0° Axis Azimuth 0°
PV modules	Model	CS6U - 320P 1500V Pnom 320 Wp
PV Array	Nb. of modules	541800 Pnom total 173376 kWp
Inverter	ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA	Pnom 1500 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	100.0 Pnom total 150000 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)	

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

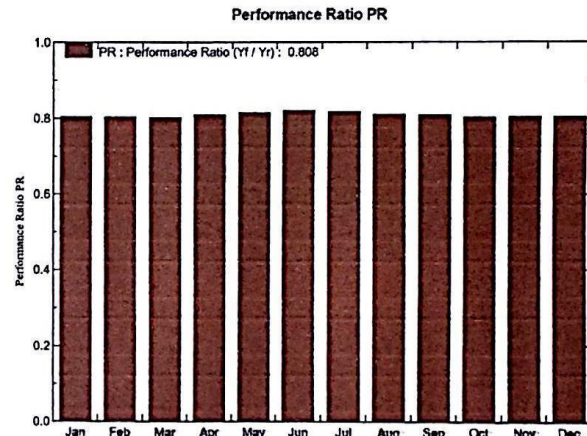
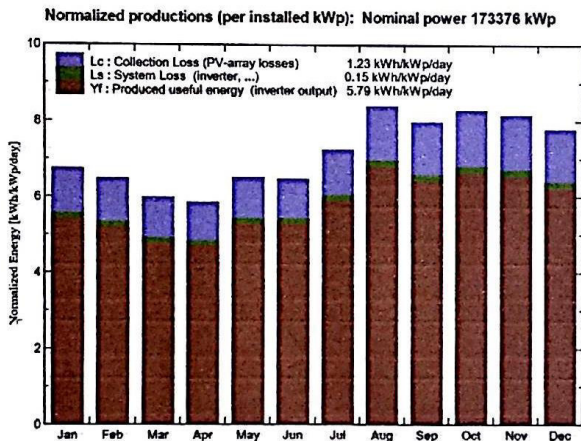


Grid-Connected System: Main results

Project : Pentecoste
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters		System type	Grid-Connected	
Near Shadings		Linear shadings		
PV Field Orientation	tracking, tilted axis	Axis-Tilt	0°	Axis-Azimuth 0°
PV modules		Model	CS6U - 320P 1500V	Pnom 320 Wp
PV Array		Nb. of modules	541800	Pnom total 173376 kWp
Inverter	ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA	Pnom	1500 kW ac	
Inverter pack		Nb. of units	100.0	Pnom total 150000 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Main simulation results
System Production **Produced Energy** **366421 MWh/year** Specific prod. 2113 kWh/kWp/year
Performance Ratio PR 80.80 %



New simulation variant
Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	170.8	83.76	27.72	209.5	194.4	29939	29204	0.804
February	149.0	76.22	27.66	181.8	168.6	25969	25324	0.804
March	151.9	76.87	27.31	185.7	172.4	26454	25793	0.801
April	144.3	73.68	26.56	175.6	162.8	25234	24616	0.809
May	161.8	76.91	27.18	202.1	187.5	29249	28564	0.815
June	154.4	65.63	26.26	194.3	180.6	28300	27838	0.820
July	172.1	61.27	26.69	224.5	209.5	32593	31813	0.817
August	198.1	53.87	26.83	260.4	244.7	37492	36554	0.810
September	187.1	73.70	26.74	239.0	223.2	34341	33494	0.808
October	202.1	72.47	27.40	256.9	240.5	36659	35729	0.802
November	192.2	69.14	27.32	244.7	228.8	35004	34114	0.804
December	189.9	69.88	28.02	241.1	224.9	34437	33577	0.803
Year	2073.8	853.41	27.14	2615.6	2438.0	375672	366421	0.808

Legends:	GlobHor Horizontal global irradiation DiffHor Horizontal diffuse irradiation T Amb Ambient Temperature GlobInc Global incident in coll. plane	GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings EArray Effective energy at the output of the array E_Grid Energy injected into grid PR Performance Ratio
-----------------	--	--

Grid-Connected System: Loss diagram

Project : Pentecoste
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	Grid-Connected	
Near Shadings	Linear shadings		
PV Field Orientation	tracking, tilted axis, Axis Tilt	0°	Axis Azimuth 0°
PV modules	Model	CS6U - 320P 1500V	Pnom 320 Wp
PV Array	Nb. of modules	541800	Pnom total 173376 kWp
Inverter	ULTRA 1500-TL-OUTD-2-US-690-M/S-DNVKEMA		Pnom 1500 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	100.0	Pnom total 150000 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)		

Loss diagram over the whole year

