



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIELLE ALVES BARBOSA

**ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA DE UM DISPOSITIVO DE
SEGUIMENTO SOLAR PARA A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

FORTALEZA

2016

DANIELLE ALVES BARBOSA

ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA DE UM DISPOSITIVO DE
SEGUIMENTO SOLAR PARA A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis.

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

Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho.

FORTALEZA

2016

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)

B196a Barbosa, Danielle Alves.
 Análise energética e financeira de um dispositivo de seguimento solar para a geração fotovoltaica /
 Danielle Alves Barbosa. – 2016.
 110 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.

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

Coorientação: Prof. Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho.

1. Seguidor solar. 2. Análise energética. 3. Análise financeira. I. Título.

CDD 621.3

DANIELLE ALVES BARBOSA

ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA DE UM DISPOSITIVO DE SEGUIMENTO
SOLAR PARA A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE)

Prof^a. Dr^a. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Francisco Gilmário Lima Barbosa e Maria Elizabete Alves Barbosa por toda compreensão.

Ao meu esposo, André Pimentel que sempre me aconselhou e incentivou a transpor todos os desafios pessoais e profissionais.

Ao meu filho, Guilherme Pimentel por me ensinar a amar incondicionalmente.

A minha irmã, Isabelle Barbosa por todas as palavras de incentivo.

Eu dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que me iluminou ao longo desta caminhada.

Ao Prof. Dr. Paulo César Marques de Carvalho, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da Banca examinadora pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas do Departamento de Indústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Agamenon Gois, Daniel Gurgel, Evaldo Mota, Walter Araújo, Antonio Braga dos Santos e João Tavares Júnior pelo incentivo.

As minhas tias Socorro Barbosa e Solange Barbosa e a minha avó Irismar Barbosa pelos valiosos ensinamentos pessoais e momentos felizes em família.

As minhas amigas Sanna Maia, Érika Moreira e Priscila Ribeiro, que com amor, carinho, dedicação e paciência sempre estiveram ao meu lado.

Aos amigos da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará - UFC, Manuel Rangel Borges, Sirgefredo Pinheiro Neto e Luis Carlos pelo companheirismo e colaboração nas revisões e sugestões de melhoria desse trabalho.

"É preciso buscar um caminho que não tenha fim, mas importante é caminhar na expectativa de encontrá-lo."

André Pimentel

RESUMO

Por estar localizada próxima à linha do Equador e não apresentar grandes variações de irradiação solar, a região Nordeste do Brasil apresenta condições favoráveis para a implantação de plantas fotovoltaicas. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de viabilidade energética e financeira de um painel fotovoltaico com seguimento solar de um eixo, instalado no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). As medições foram realizadas em dois sistemas com seguidor solar em malha aberta e malha fechada, em intervalos de posicionamentos angulares de 15, 30, 60 e 180 minutos. Utilizando a média da irradiância solar medida, foi selecionado um dia típico e o intervalo de atualização da posição angular para cada sistema. A geração líquida de energia elétrica dos painéis com seguimento foi determinada a partir da diferença entre a energia elétrica gerada e a energia elétrica consumida para operação do seguimento solar. Como carga, foi considerado um consumo representativo de uma residência familiar típica brasileira. Finalmente, foi analisada a viabilidade financeira do sistema seguidor solar com controle de posicionamento efetuado por microcontrolador e por controlador lógico programável. A análise da viabilidade financeira do projeto baseou-se em fluxos de caixa com bandeiras tarifárias fixas, ou seja, considerando um único cenário para os meses analisados. Sob o ponto de vista do melhor aproveitamento da energia solar, os resultados demonstram uma maior capacidade de geração de eletricidade do sistema móvel em relação ao fixo, com a desvantagem de o sistema móvel possuir uma implementação mais complexa. As análises permitem concluir que um sistema com seguidor solar com intervalo de atualização da posição angular de 60 minutos e controle por malha fechada, apresenta um ganho bruto de 27,42% na produção de energia elétrica em relação ao painel fixo. Considerando os ganhos líquidos, ambos com atualização de 60 minutos, o sistema com painel móvel em malha aberta e malha fechada apresenta em relação ao painel fixo ganhos de 6,3% e 11,3%, respectivamente. O tempo médio de *payback* descontado dos sistemas de controle de posicionamento angular com as malhas aberta e fechada e uso de microcontrolador foi de aproximadamente 25 anos. Assim, caso haja interesse em utilizar uma das malhas de controle, faz-se necessário aprofundar a análise dos custos de investimentos, com a proposição de alternativas do ponto de vista financeiro.

Palavras-chave: Seguidor solar, Eficiência de plantas fotovoltaicas, Geração distribuída.

ABSTRACT

Being located close to the equator and it has few variations of solar radiation, the Northeast region of Brazil presents favorable conditions for the deployment of photovoltaic plants. Thus, the work present aims to perform a study of energetic viability and financial of a photovoltaic panel with a solar tracking shaft, installed at Alternative Energy Laboratory (LEA) of the Federal University of Ceará (UFC). Measurements were made in two solar tracker systems with open loop and closed loop angular positions at intervals of 15, 30, 60 and 180 minutes. Using the average irradiance, it was selected a typical day and the update interval of the angular position for each system. The net electric power generation of panels with tracking was determined from the difference between the electric power generated and the power consumed to operation of solar tracking. As cargo, it was considered a representative consumption of a typical Brazilian family residence. Finally, it analyzed the financial viability of the solar tracker system with motion control performed by microcontroller and programmable logic controller. The analysis of the financial viability of the project was based on cash flows with fixed tariff flags, ie considering a unique scenario for the months analyzed. From the point of view of better utilization of solar energy, the results demonstrated a greater capacity of electricity generation mobile system in relation to the fixed, with the disadvantage of the mobile system having a more complex implementation. The analysis allow us to conclude that a system with solar tracker update interval of the angular position of 60 minutes and control by closed loop, has a gross gain of 27.42% in the production of electricity in relation to the fixed panel. Considering the net gains, both with upgrades of 60 minutes, the system with mobile panel in open and closed loop present features relative to the fixed panel gains of 6.3% and 11.3%, respectively. The average time to payback discounted the angular positioning control systems with the open and closed loops and microcontroller use was approximately 25 years. Thus, if there is interest in using one of the control loops, it is necessary to deepen the analysis of investment costs, with the proposition of alternatives from a financial point of view.

Keywords: Solar tracker, efficiency of photovoltaic plants, distributed generation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| OCDE | Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| LEA | Laboratório de Energias Alternativas |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| FV | Fotovoltaico |
| CLP | Controlador Lógico Programável |
| CC | Corrente Contínua |
| VPL | Valor Presente Líquido |
| TIR | Taxa Interna de Retorno |
| COELCE | Companhia Energética do Ceará |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| SP | <i>Set Point</i> |
| PV | Variável do Processo |
| RTC | <i>Real Time Clock</i> |
| FC1 | Fim de Curso 1 |
| FC2 | Fim de Curso 2 |
| UFC | Universidade Federal do Ceará |
| NEPAU | Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana |
| SCADA | <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos (geral e específicos) | 4 |
| <i>1.1.1 Geral</i> | 4 |
| <i>1.1.2 Específicos</i> | 4 |
| 1.2 Estrutura da Dissertação | 5 |
| 2 CONCEITOS TEÓRICOS E PANORAMA FOTOVOLTAICO | 6 |
| 2.1 Fundamentos da irradiação solar | 6 |
| 2.2 Energia solar fotovoltaica | 13 |
| 2.3 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo | 16 |
| 2.4 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil | 18 |
| 3 SEGUIDORES SOLARES | 21 |
| 3.1 Classificação dos seguidores solares | 21 |
| 3.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico | 28 |
| 3.3 Estado da arte dos seguidores solares | 28 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 32 |
| 4.1 Laboratório de Energias Alternativas | 32 |
| 4.2 Painéis Fotovoltaicos | 33 |
| 4.3 Piranômetro | 36 |
| 4.4 Controlador Lógico Programável (CLP) | 37 |
| 4.5 Sistema SCADA | 38 |
| 4.6 Protótipo desenvolvido do seguidor solar | 38 |
| 4.7 Controle e aquisição de dados | 42 |
| 4.8 Metodologia do funcionamento do seguidor solar | 45 |
| <i>4.8.1 Funcionamento em malha aberta</i> | 46 |
| <i>4.8.2 Funcionamento em malha fechada</i> | 47 |
| 4.9 Análise Financeira | 52 |
| 4.10 Considerações finais | 53 |
| 5 ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA | 54 |
| 5.1 Irradiação | 54 |
| 5.2 Potências fornecidas pelos painéis fotovoltaicos | 58 |
| 5.3 Energia elétrica utilizada para o funcionamento do seguidor solar | 69 |
| <i>5.3.1 Energia elétrica utilizada no painel fixo (com móvel em malha aberta)</i> | 69 |

| | |
|---|-----------|
| <i>5.3.2 Energia elétrica utilizada no painel móvel em malha aberta</i> | <i>69</i> |
| <i>5.3.3 Energia elétrica utilizada no painel fixo (com móvel em malha fechada).....</i> | <i>72</i> |
| <i>5.3.4 Energia elétrica utilizada no painel móvel em malha fechada.....</i> | <i>73</i> |
| 5.4 Análise financeira do seguidor solar | 76 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 88 |
| 6.1 Sugestões para trabalhos futuros | 90 |
| REFERÊNCIAS | 91 |
| APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES GERADAS..... | 96 |
| APÊNDICE B – TABELA DOS HORÁRIOS E VALORES ESTABELECIDOS PARA O DESLOCAMENTO ANGULAR DO SEGUIDOR SOLAR. | 97 |

1 INTRODUÇÃO

Segundo a ANEEL (2008), o consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. O consumo de energia reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto à capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis, que demandam combustíveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos, que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica. O resultado tem sido o crescente aumento da demanda de energia que pode deixar de ser cumprida pela tecnologia tradicional de geração de energia, pois esta não tem expandido na mesma proporção da demanda.

Durante o século XX, a oferta de energia, obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e às transformações da economia mundial. Nos primeiros anos do século atual, o cenário mudou ao ser colocado à prova por uma nova realidade: a necessidade do desenvolvimento sustentável (ANEEL, 2008).

Sabe-se que as tecnologias e fontes energéticas convencionais usadas atualmente não são apropriadas ecologicamente e estão provocando sérios danos ao meio ambiente. Dentre as questões ambientais mais relevantes da atualidade, as mudanças climáticas globais se destacam, pois é um problema que ameaça o mundo inteiro.

Pesquisadores da área têm apresentado evidências que apontam as atividades antrópicas (atividades produzidas pelo homem) como as grandes responsáveis pela gravidade desse problema. Um dos principais causadores das mudanças climáticas é o aumento do aquecimento global que é causado principalmente pelo acréscimo da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, que por sua vez resulta basicamente do crescimento indiscriminado desde a revolução industrial das atividades econômicas, em especial das industriais (PAMPLONA; GODOY, 2007).

As fontes renováveis de energia despertam interesse no mundo todo, devido ao fato de seu uso ser ambientalmente correto. No Brasil isso não poderia ser diferente, pois sua matriz elétrica é composta de 74,6% com energia renovável, segundo dados do balanço energético nacional 2015 (EPE, 2015). Grande parte dessa energia vem de hidroelétricas que precisam de rios perenes para viabilizar sua construção. O Nordeste brasileiro, no entanto, conta apenas com um rio de grande porte, o rio São Francisco, com essa característica. Nesse caso, a energia utilizada no abastecimento dessa região brasileira precisa ser transportada a

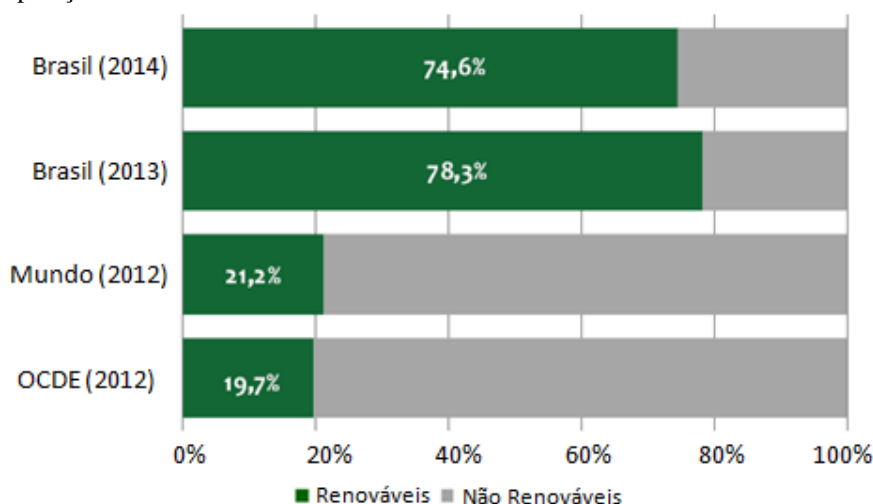
grandes distâncias através de linhas de transmissão, gerando custos de implantação e manutenção dessas redes. Por outro lado, outras fontes renováveis de energia como a solar, eólica e biomassa estão presentes na região, surgindo como principais opções na substituição gradativa das energias poluentes. Estas fontes não contribuem para o aquecimento global, além de possuírem características que as tornam atrativas como o uso e produção descentralizada, envolvendo um grande número de produtores e consumidores e baixo custo de manutenção, apesar do custo inicial relativamente mais alto comparado a sistemas convencionais.

Segundo EPE (2015), os dados publicados no Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia, tanto a oferta quanto a demanda de energia elétrica cresceram nos últimos anos, porém a demanda esteve bem próxima da oferta. Em 2014, a diferença entre a oferta e a demanda foi apenas 10,1%. Isto significa que o Brasil não tinha grande excedente de energia elétrica, sendo, portanto necessário diversificar a matriz energética, além de descentralizar e incentivar a geração de energia elétrica através de fontes alternativas no País.

Segundo EPE (2015), em 2012 e 2013, a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira manteve-se entre as mais elevadas, comparando-se com os dados obtidos no mundo e OCDE¹, conforme é observado na Figura 1.1.

Segundo, Ricardo Baitelo, coordenador da Campanha de Energia do Greenpeace “gerar energia mais perto de onde ela será consumida, o que chamamos de geração descentralizada, é a maneira mais segura de garantir que não haverá falta de eletricidade no país”. “A descentralização evita as perdas de energia que acontecem no processo de transmissão e pode garantir fornecimento a um milhão de pessoas que ainda não têm energia elétrica no Brasil.” (GREENPEACE, 2011).

Figura 1.1 - Comparação da matriz elétrica brasileira com o restante do mundo



Fonte: EPE (2015).

¹ A OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) é um grupo formado por 34 países, com alta renda e alto índice de desenvolvimento humano (IDH).

A disponibilidade de energia elétrica é bastante desigual. Uma parte da população vive em áreas onde o abastecimento de eletricidade é precário, habita em áreas isoladas onde o atendimento por meio da extensão da rede convencional é impossível por motivos naturais e/ou financeiros, como distância, dificuldade de acesso, localização dentro de reservas ambientais, áreas insulares ou montanhosas e clima rigoroso.

Estas comunidades são, principalmente, localizadas em áreas rurais e remotas do país, dentre elas pode-se citar a comunidade Monte Alegre na Bahia, a comunidade no distrito de Eugênio de Melo, em São José dos Campos (SP), a comunidade Quenta Sol no Sudoeste da Bahia, as comunidades São Sebastião do Rio Preto, Terra Nova, Mourão, Nossa Senhora do Carmo, Santa Luzia (Lago Grande), Nossa Senhora do Nazaré, São José (Lagoa do Pretinho), Santa Maria, Bom Jesus do Paduari, Aracari e Sobrado no Amazonas.

De acordo com Pinho et al (2009), existem cerca de 300 mil comunidades isoladas, que não têm acesso à energia elétrica na Amazônia Legal, uma área composta por nove estados, representando aproximadamente 61% do território nacional, fator que dificulta adequadas condições de vida locais, desenvolvimento regional, social e econômica, bem como a prestação de serviços essenciais, tais como, saúde, comunicação, e até mesmo entretenimento.

Novas regulamentações ambientais e o avanço de pesquisas na área de energias renováveis têm sido elementos impulsionadores para o desenvolvimento de um novo ciclo energético baseado em fontes menos poluentes e menos agressivas. Com a resolução normativa 687 da ANEEL, foram estabelecidas as condições gerais para a conexão à rede da microgeração (potência instalada menor que 75 kW) e minigeração (potência instalada entre 75 kW e 5 MW) distribuída no Brasil e criou o Sistema de Compensação de Energia. Essa resolução refere-se à possibilidade de o consumidor, particular ou empresa, poder produzir energia elétrica, como forma de reduzir perdas nas redes de distribuição, de diminuir a dependência externa e de dar ao consumidor um papel mais ativo, recorrendo a equipamentos de pequena escala, como por exemplo, painéis solares, microturbinas eólicas ou mini-hídricas. A energia elétrica produzida pode ser utilizada para atender o consumo local e o excedente injetado na rede, gerando créditos de energia.

Segundo Rütther (2004), dentre as energias renováveis que tem apresentado um efetivo crescimento mundial nas últimas décadas, está a energia solar fotovoltaica (FV), por possibilitar a geração de energia elétrica de forma distribuída, não necessitando, portanto, de extensas linhas de transmissão e distribuição, por ser uma fonte silenciosa, que possibilita a

instalação de sistemas de diferentes potências e ainda por integrar-se à edificações no meio urbano, sem necessitar de áreas extras para sua instalação

Outro fator importante na expansão do uso da tecnologia fotovoltaica para geração de eletricidade é o apelo ambiental, pois estes sistemas têm como característica a não modificação do equilíbrio térmico da Terra. Os equipamentos solares utilizam parte da irradiação disponível como calor ou como eletricidade útil. Além disso, tais sistemas são capazes de contribuir para o suprimento de energia elétrica, sem emissão de gases de efeito estufa ou de gases ácidos, não é necessária a formação de lagos para reservatórios, o desmatamento só ocorre em grandes instalações, as quais muitas vezes são construídas em áreas desérticas ou semi-áridas (ALVES, 2008).

Segundo Oliveira (2007), nos últimos cinquenta anos, o uso da energia solar no mundo tem crescido consideravelmente em suas principais modalidades de aproveitamento: térmica e fotovoltaica. Apesar da significativa evolução da tecnologia fotovoltaica ao longo das últimas décadas, o custo da energia produzida por esses sistemas continua sendo elevado quando comparado à energia produzida por sistemas convencionais. Diversos meios que tendem a reduzir esses custos têm sido experimentados, dentre os quais o uso de dispositivos de acompanhamento do movimento do Sol (seguidores).

1.1 Objetivos (geral e específicos)

1.1.1 Geral

Desenvolver um protótipo de um seguidor móvel para melhorar a eficiência da captação de irradiação solar por painéis fotovoltaicos.

1.1.2 Específicos

- a) Fabricar o protótipo da estrutura mecânica do seguidor solar;
- b) Desenvolver a lógica de programação no CLP para realizar o controle de posição angular do seguidor;
- c) Realizar a comunicação do seguidor ao sistema de aquisição de dados;
- d) Testar e identificar a melhor estratégia para o funcionamento do seguidor solar;
- e) Determinar o ganho de energia entre o painel fotovoltaico fixo e o painel fotovoltaico móvel;

- f) Analisar a viabilidade financeira do projeto através do valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e payback.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação apresenta a implementação do seguidor solar de um eixo e do sistema de aquisição de dados, controle e monitoramento do Laboratório de Energias Alternativas - LEA da Universidade Federal do Ceará.

A dissertação está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo têm-se a introdução, metodologia aplicada ao desenvolvimento deste trabalho, o objetivo geral e específico. No segundo capítulo são abordados conceitos teóricos sobre a irradiação solar e sobre a tecnologia fotovoltaica e o panorama da utilização desta tecnologia no Brasil e no mundo. No terceiro capítulo são descritos conceitos teóricos sobre os seguidores solares e o estado da arte sobre os avanços e pesquisas que vem sendo desenvolvidas. No quarto capítulo são descritos os equipamentos utilizados e a metodologia de funcionamento para o seguidor solar proposto. No quinto capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados com o seguidor solar proposto e comparados ao sistema fixo já existente. No sexto e último capítulo são expostas as conclusões obtidas e as propostas para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS TEÓRICOS E PANORAMA FOTOVOLTAICO

O presente capítulo descreve conceitos que influenciam na irradiação solar, sua importância para os sistemas FV e apresenta dados de irradiação solar nas cinco regiões brasileiras. Em seguida é descrito o funcionamento dos painéis fotovoltaicos, as vantagens e desvantagens dos seguidores solar e uma análise da diminuição dos custos dos módulos fotovoltaicos. Na terceira seção é abordado o panorama mundial da utilização da energia solar fotovoltaica. Na última seção é feito um levantamento dos principais incentivos à geração elétrica através do efeito fotovoltaico no Brasil e o panorama nacional da utilização da energia solar fotovoltaica.

2.1 Fundamentos da irradiação solar

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém de uma região do Sol denominada fotosfera com temperatura superficial da ordem de 5.778 K (5.504,85 °C) e encontra-se distante da Terra por cerca de 149.598.106 km. Uma vez que a intensidade de energia radiante diminui na proporção inversa do quadrado da distância da fonte, a temperatura da superfície da Terra é mais baixa do que a do Sol com uma temperatura média de cerca de 287 K (14 °C ou 57 °F) (VIGNOLA; MICHALSKY; STTOFEL, 2012).

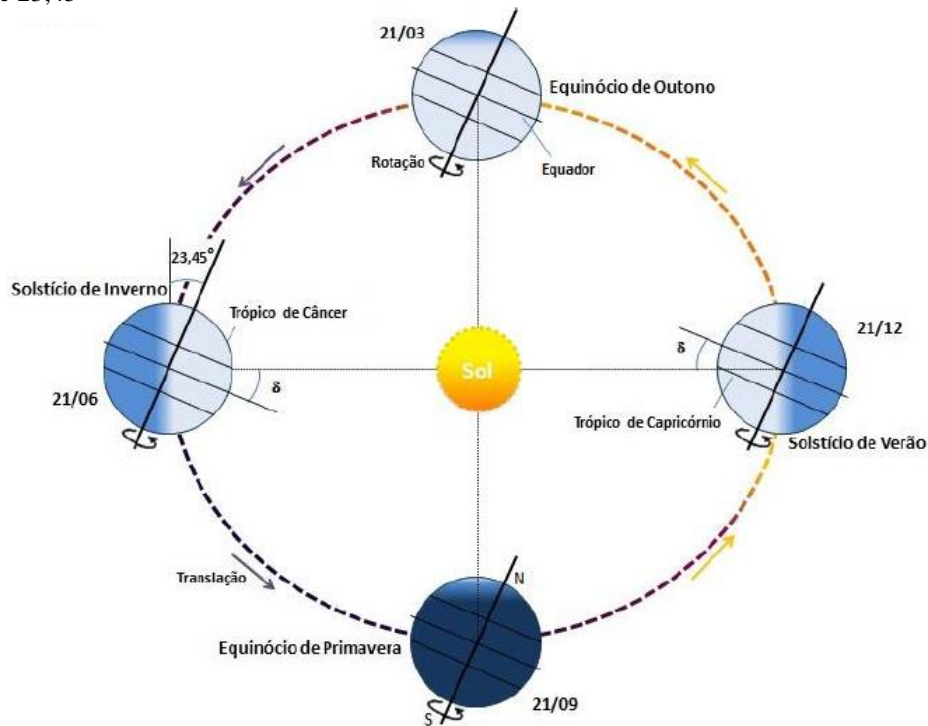
A radiação que alcança o topo da atmosfera da Terra é conhecida por radiação extraterrestre e é relativamente constante, mas a que alcança a superfície vai variar devido a diversos fatores como efeitos atmosféricos de absorção e reflexão, variações locais como níveis de vapor de água, nuvens e poluição, latitude do local, estação do ano, data e hora do dia.

A Terra, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade ($\epsilon \approx 0,017$). No movimento de rotação diário o seu eixo norte e sul, que é perpendicular à linha do Equador, forma uma inclinação ou obliquidade em relação ao plano normal à elipse, de aproximadamente 23,45°. Essa inclinação, juntamente com o seu movimento de translação, dá origem às estações do ano.

Devido à inclinação da Terra, os raios do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano, vão atingir o plano equatorial com uma inclinação que vai variar conforme o dia do ano. O ângulo de desvio do Sol medido diretamente a partir do equador é denominado Declinação Solar (δ) e varia entre $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$, sendo positivo quando incide no hemisfério Norte e negativo no hemisfério Sul. Nos dias 21 de setembro (equinócio de primavera) e 21

de março (equinócio de outono) os raios solares se alinham com o plano do Equador ($\delta = 0$). Na Figura 2.1 é ilustrado a Declinação Solar em quatro posições da Terra ao longo do ano.

Figura 2.1 - Declinação Solar (δ) em quatro posições da Terra ao longo do ano, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,45^\circ$



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

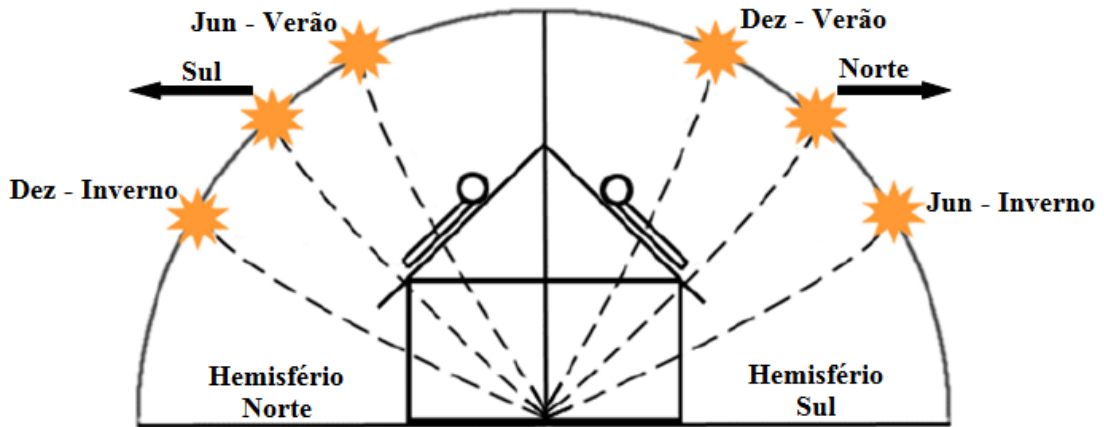
De acordo com Luque e Hegedus (2011), a declinação solar pode ser estimada através da equação:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[\frac{360(d_n + 284)}{365} \right] \quad (2.1)$$

Em que d_n é o dia do ano contado de 1 a 365 a partir de 1 de janeiro.

Essa inclinação faz com que o Sol seja mais alto no céu no verão do que no inverno, causando mais horas de Sol no verão e menos horas de luz solar no inverno. Conforme se observa na Figura 2.2, o painel solar deve ser instalado no hemisfério norte e no hemisfério sul, com a face virada para o Sul e para o Norte, respectivamente.

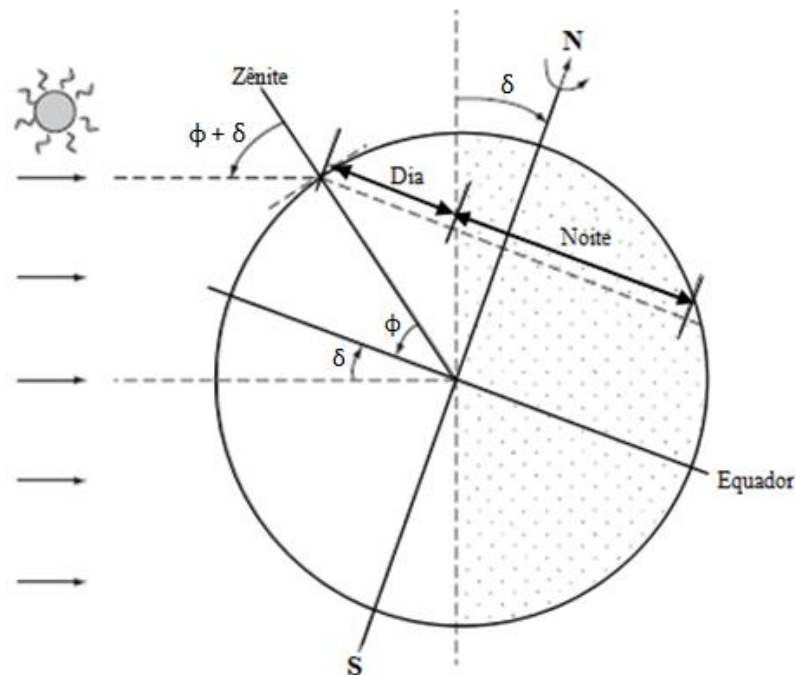
Figura 2.2 - Sol nos hemisférios



Fonte: Adaptado de Cortez (2013).

A Figura 2.3 ilustra os ângulos da declinação solar (δ) e da latitude (Φ), que determinam a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade da Terra.

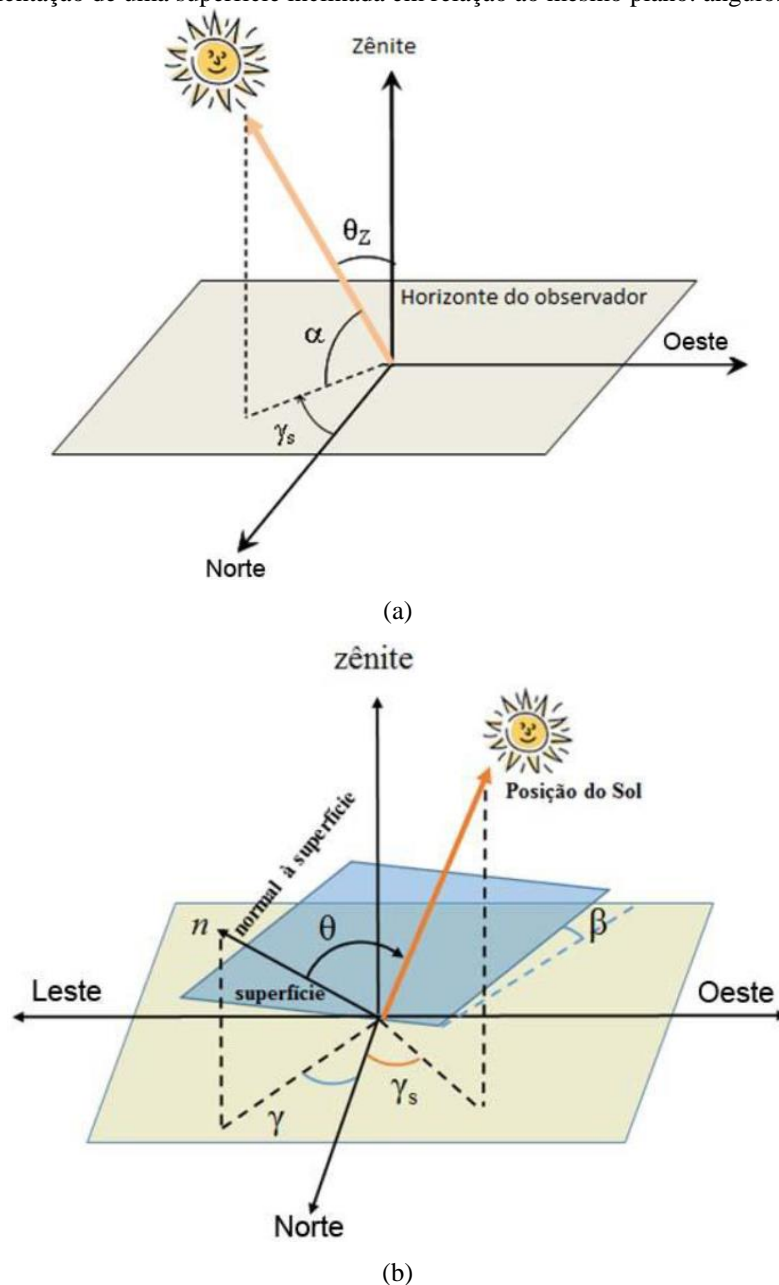
Figura 2.3 - Posição da Terra em relação ao Sol ao meio-dia com declinação negativa (inverno no Hemisfério Norte e verão no Hemisfério Sul)



Fonte: Adaptado de Luque e Hegedus (2011).

As relações geométricas entre os raios solares, que variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre, são descritas através de vários ângulos, apresentados na Figura 2.4 (a) e Figura 2.4 (b).

Figura 2.4 - (a) Ilustração dos ângulos θ_z , α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano: ângulos β , γ , γ_s e θ .



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Os ângulos formados entre as relações geométricas e os raios solares são definidos como:

- Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios incidentes e a vertical local (Zênite) num determinado instante.
- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador).
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s): também chamado azimute solar, é o ângulo formado entre a projeção da linha Sol-Terra sobre a horizontal e a direção Norte-Sul. O

deslocamento angular é tomado a partir do Norte ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$), sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste).

- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas convenções do azimute solar.

- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal.

- Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios incidentes e a normal à superfície de captação.

A compreensão dos ângulos descritos acima é necessária para a operação de dispositivos que rastreiam o Sol, ou seja, que se movimentam de forma que os raios solares sempre incidam no equipamento solar com o ângulo que maximize a produção de energia elétrica ou térmica a partir da energia oriunda do Sol.

A norma técnica brasileira ABNT NBR 10899:2013 define a radiação solar como sendo a forma de transferência de energia advinda do sol através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons. Irradiação solar é definida como sendo a quantidade de irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia. A irradiância solar é a taxa da radiação solar incidente em uma superfície por unidade de área, normalmente medida por W/m^2 e simbolizada por G . Este é o parâmetro inicial utilizado para o cálculo da quantidade estimada de energia elétrica que um sistema fotovoltaico é capaz de produzir.

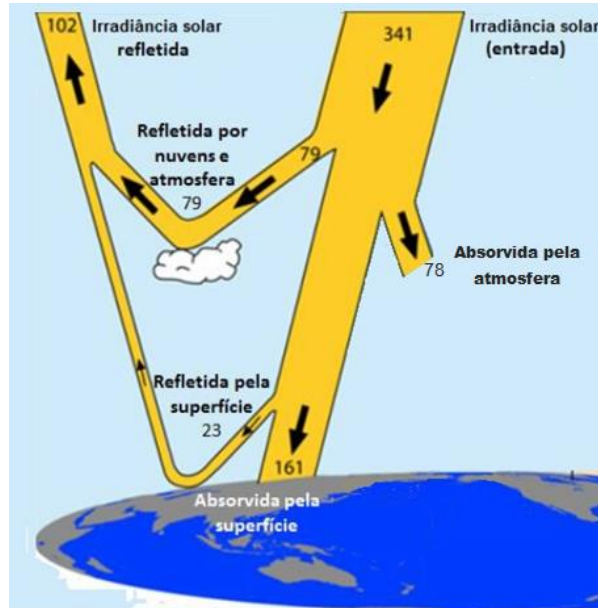
A intensidade da irradiância extraterrestre (E_0) depende da distância entre o Sol e a Terra. Durante o decorrer do ano, essa distância varia devido à excentricidade da elipse que descreve a trajetória da Terra em torno do Sol. Segundo GREENPRO (2004), essa distância pode variar entre $1,47 \times 10^8$ km e $1,52 \times 10^8$ km. Devido a este fato, a irradiância E_0 varia entre 1.325 W/m^2 (afélio) e 1.412 W/m^2 (periélio). O valor médio é designado por constante solar (I_0), tendo valor aproximado de 1.367 W/m^2 .

Considerando que o raio médio da Terra é 6.371 km, e considerando o valor da irradiância de 1.367 W/m^2 incidindo sobre a área projetada da Terra, conclui-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera, é de aproximadamente 174 mil TW (terawatts) (PINHO E GALDINO, 2014).

No entanto, apenas uma parte da quantidade total da irradiância solar atinge à superfície terrestre, conforme observado na Figura 2.5. Segundo Trenberth, Fasullo e Kiehl (2009), com base em medições de março de 2000 a maio de 2004, a irradiância solar que

incide no topo da atmosfera terrestre é de 341 W/m^2 ; somente 54 % atinge a superfície terrestre (184 W/m^2): deste total, aproximadamente 7 % é refletida e 47 % é absorvida pela superfície terrestre. Os 46 % restantes (157 W/m^2) são absorvidos ou refletidos diretamente pela atmosfera. Portanto, da potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, cerca de 94 mil TW chegam efetivamente à superfície terrestre.

Figura 2.5 - Balanço energético anual da Terra em W/m^2



Fonte: Adaptado de Trenberth; Fasullo e Kiehl (2009).

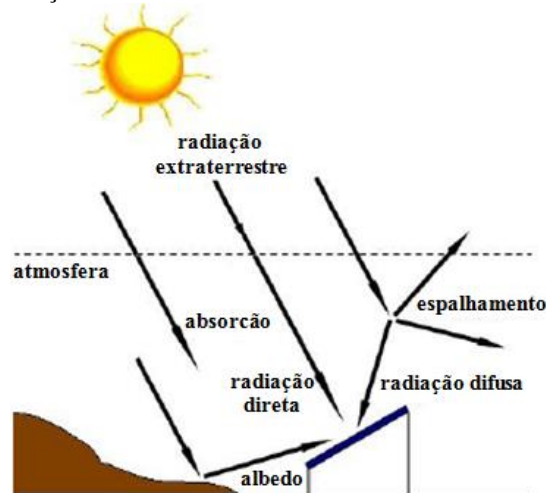
De acordo com os dados divulgados em 2014 pelo *Key World Energy Statistics*, a produção mundial de energia através de hidrelétricas no ano de 2012 foi cerca de 3,7 mil TWh (IEA, 2014). Considerando que a quantidade de energia solar recebida na superfície terrestre é de 94 mil TWh, o potencial solar é aproximadamente 25 vezes maior do que a produção anual em hidrelétricas em 2012.

À medida que a irradiação solar passa através da atmosfera da Terra, sofre influências do fenômeno de espalhamento, através das nuvens, gotas de água e poeira em suspensão, da absorção de componentes ali presentes, como por exemplo, moléculas de gases atmosféricos e partículas denominados aerossóis e da reflexão. O resultado de todos estes processos é a decomposição da radiação solar incidente sobre um receptor na superfície da Terra em componentes claramente diferenciados.

A radiação direta, é formada por feixes de luz que não são refletidas ou espalhadas, atinge a superfície em uma linha reta do Sol e produz sombras nítidas. Radiação difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer

espalhamento pela atmosfera terrestre. Quando a superfície analisada é inclinada com relação a horizontal, haverá outra componente denominada de albedo, que é refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). O total de irradiação que incide sobre uma superfície é o somatório destes (direta + difusa + albedo) e é denominada radiação global. A Figura 2.6 apresenta as três componentes citadas.

Figura 2.6 - Componentes da radiação solar



Fonte: Pinho et al (2008).

A irradiação varia de um modo significativo em diferentes localidades, o valor de cada componente pode variar de uma região para outra do planeta e de um período do ano para outro.

O índice de irradiação solar do Brasil é um dos mais altos do mundo. Grande parte do território brasileiro está localizado relativamente próxima à linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações de irradiação solar durante o dia. Segundo Brasil solair (2013), a região nordeste do Brasil, por estar ainda mais próxima da linha do Equador do que as demais regiões, é a que possui maiores índices de irradiação solar, variando em um dia entre 5.700 e 6.100 Wh/m².

Esses potenciais colocam a região nordeste como uma região extremamente viável para a implantação de quaisquer instalações solares, para suas aplicações. Os principais países produtores estão situados em latitudes médias e altas, como Japão, Alemanha e os Estados Unidos.

A Figura 2.7 ilustra o potencial anual médio de energia solar para o período de 10 anos para as regiões brasileiras. A região Nordeste apresenta a maior disponibilidade energética, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste. A região Norte, por estar próxima a

linha do Equador deveria ter índices de irradiação próximos ao da região Nordeste, mas devido as características climáticas da região Norte seu potencial solar médio é reduzido a valores próximos ao da região Sul (PEREIRA et al, 2006).

Figura 2.7 - Potencial anual médio de energia solar em cada uma das cinco regiões brasileiras



Fonte: Adaptado de Pereira et al (2006).

Segundo Rütther (apud TORRES, 2012), seriam necessários apenas 0,045% da área total do território nacional, ou seja, 3.844 Km² em painéis fotovoltaicos, para gerar a energia consumida no Brasil em 2013, que segundo o EPE (2014) foi de 463,3 TWh, o que revela que esta fonte renovável de energia tem muito a oferecer a matriz energética nacional, apesar de ainda ter uma participação muito incipiente.

2.2 Energia solar fotovoltaica

Crises no setor elétrico são cada vez mais comuns, portanto a questão energética vem sendo uma preocupação mundial. Segundo Braun-Grabole (2010), durante a última década, os setores de energia de diferentes países sofreram profundas transformações, com grande tendência à desverticalização, ou seja, houve uma separação entre as empresas de geração, transmissão e distribuição e ao estímulo à descentralização da geração de energia elétrica, impondo à rede de distribuição um papel central nesta nova modelagem

Segundo CEMIG (2012), no Brasil existem alguns fatores que favorecem uma expansão do mercado de módulos fotovoltaicos: o fato de possuir (como riqueza natural) grandes jazidas de quartzo de qualidade, além de um grande parque industrial que extrai esse mineral e o beneficia, transformando-o em silício grau metalúrgico, matérias-primas importantes para a construção dos painéis. O país possui um potencial solar muito favorável à geração, comparativamente aos países líderes no mercado de energia solar fotovoltaica. Por exemplo, os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²) (PEREIRA et al, 2006).

Um módulo fotovoltaico gera energia elétrica a partir de qualquer componente da irradiação solar, principalmente quando esta componente incide perpendicular ao seu plano, isto implica em uma maior geração de energia quando o módulo fotovoltaico está faceando diretamente o Sol. A utilização de um rastreador solar aumenta a produção de energia mantendo os módulos fotovoltaicos perpendiculares aos raios solares. Diferentes sistemas de rastreamento de sol têm sido desenvolvidos para acompanhar o movimento do sol (OLIVEIRA, 2007).

Os seguidores solares construídos para sistemas de geração fotovoltaica apresentam a vantagem de gerar mais eletricidade com aproximadamente a mesma quantidade de espaço necessário para os sistemas de inclinação fixa, com isso há uma redução do tempo de retorno do investimento.

O custo das células solares é a principal barreira para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos estão decrescendo, devido ao aperfeiçoamento dos processos de fabricação e o aumento das eficiências dos módulos fotovoltaicos, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

Com a geração distribuída, os custos com infraestrutura de transmissão de energia são evitados, bem como as perdas de energia associadas e o custo final da energia pode ser comparado com tarifas de consumidor final ao invés de ser comparado com custos de energia na planta de geração.

Segundo Epia (2012 apud TORRES, 2012), a tecnologia fotovoltaica mostrou reduções de preços, reduzindo em 20 % o valor dos módulos a cada vez que a capacidade instalada acumulada dobrou. Segundo dados do SolarServer (2015), o preço médio de um

módulo fotovoltaico de silício cristalino na Europa, em março de 2015, era de 0,60 €/Wp, ou seja, cerca de 77% menor que em maio de 2009, quando era comercializado a 2,62 €/Wp.

A diminuição dos custos de produção e venda de módulos e sistemas fotovoltaicos incluindo aparelhos eletrônicos e de segurança, cabeamento, montagem de estruturas e instalação foi devido à inovação tecnológica nestes setores, com a substituição por novos materiais e módulos mais eficientes. O apoio por parte do governo com a criação de programas de incentivo à geração de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos também tem sido fator decisivo.

Diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos e as células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino) dominam o mercado mundial atualmente. Esta tecnologia vem respondendo sempre por mais de 81% da produção mundial desde 2000, e em 2011 atingiu 87,9% deste mercado. As outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$) e silício crescido em fitas (Si-fitas). Células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (DSSC – *Dye Sensitized Solar Cells*) ou polímeros também estão sendo desenvolvidas (CRESESB, 2014).

O uso predominante do silício para a fabricação de módulos comerciais se deve ao bom domínio de sua tecnologia, ao seu alto rendimento relativo e à sua confiabilidade demonstrada durante várias décadas (CHIVELET, 2010 apud ZOMER, 2014).

Desde janeiro de 1993 a revista internacional *Progress in Photovoltaics* vem publicando listas com o estado da arte das células e módulos mais eficientes disponíveis. Em 2014, a célula de silício cristalino mais eficiente reportada apresentou eficiência de 25,0 +- 0,5% e o módulo de silício cristalino mais eficiente, 22,9 +- 0,6% (GREEN *et al*, 2014 apud ZOMER, 2014).

Existem basicamente dois tipos de sistemas fotovoltaicos: isolados (ou autônomos) e conectados à rede elétrica (SFCRs). No sistema isolado, a geração energética fotovoltaica pode ser armazenada em um banco de baterias. Já nos sistemas conectados à rede, a característica fundamental é que dispensam os bancos de baterias. Estes sistemas são instalados de tal maneira que quando o gerador solar fornece mais energia do que a necessária para o atendimento da instalação consumidora, o excesso é injetado na rede elétrica pública e a instalação consumidora acumula um crédito energético (sistema de compensação). Por outro lado, quando o sistema solar gera menos energia do que a demandada pela instalação

consumidora, o déficit é suprido pela rede elétrica. Este sistema de medição e compensação de energia é utilizado em países como Japão e Estados Unidos e foi recentemente aprovado e regulamentado no Brasil (ANEEL, 2012 apud ZOMER, 2014).

Nas instalações conectadas à rede, o sistema fotovoltaico pode ainda ser feito de duas formas, centralizado ou descentralizado. A instalação fotovoltaica centralizada e conectada à rede é feita com a instalação de um grande número de módulos em um único local (ocupando uma grande área), que irá gerar energia elétrica a ser transmitida e distribuída até os locais de utilização. As instalações descentralizadas e conectadas à rede são instalações menores, que geram uma quantidade menor de energia elétrica, mas que podem ser instaladas sobre edificações, em regiões remotas e junto aos pontos de consumo, não necessitando de linhas de transmissão (SANTOS, 2013).

2.3 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo

Segundo o Ren21 (2014), pela primeira vez foi instalada em 2014 mais eletricidade via conversão fotovoltaica no mundo do que via conversão eólica, crescendo 55% ao ano nos últimos cinco anos.

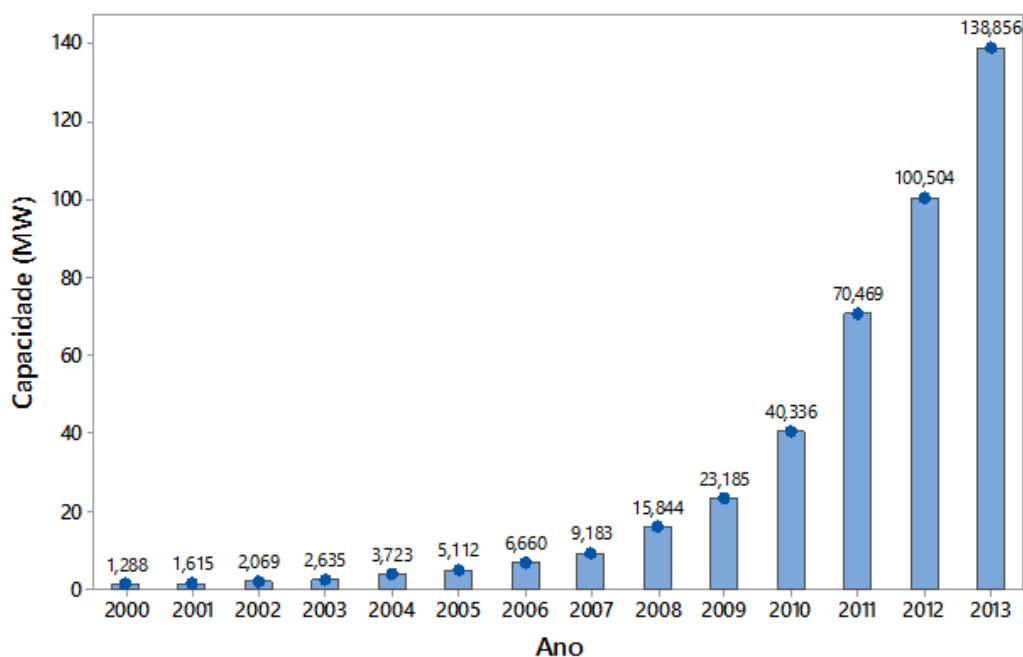
Segundo dados divulgados no relatório anual do EPIA (2014), o mercado de energia solar fotovoltaica teve um ano recorde em 2013, acrescentando 38,4 GW de potência com novas instalações e somando um total de 138,9 GW, o que representa uma produção de 160 TWh de eletricidade por ano. Este volume de energia é suficiente para atender às necessidades energéticas anuais de 45 milhões de lares europeus, este é também equivalente à eletricidade produzida por 32 grandes usinas de carvão.

Pela primeira vez desde 2003 a Europa perdeu a liderança para a Ásia em termos de novas instalações. Em primeiro lugar está a China, representando quase um terço da capacidade global adicionada, e depois o Japão e Estados Unidos. A tendência é que a China continue liderando o mercado fotovoltaico pelos próximos anos. A partir de 2013, os sistemas FV começaram a desempenhar um papel importante na geração de eletricidade em alguns países, especialmente na Europa, enquanto os preços mais baixos estão abrindo novos mercados na África, Oriente Médio e América Latina (EPIA 2014).

Em termos de capacidade global acumulada, a Europa ainda lidera com mais de 81,5 GW instalados até 2013, representando cerca de 59% da capacidade mundial FV total acumulada. Em seguida, tem-se os países da Ásia Pacífico com 40,6 GW, Estados Unidos

com 13,7 GW e China com 3,1 GW. A evolução da capacidade acumulada desde o ano 2000 até 2013 a nível mundial pode ser observada na Figura 2.8

Figura 2.8 - Evolução da capacidade global acumulada no período de 2000 – 2013



Fonte: Adaptado de EPIA (2014).

Segundo EPIA (2014), a China foi o país que mais investiu no setor em 2013. Responsável por 43% das novas instalações FV fora da Europa, desempenho que garantiu a primeira colocação no *ranking* de países com maior capacidade instalada em 2013, com 12,9 GW de potência instalada. No total, o país possui 13% da energia solar do mundo totalizando 19,9 GW.

O Japão responde por cerca de 10% do mercado mundial de energia solar, com capacidade de 13,6 GW de potência acumulada. Em 2013 foram instalados 6,9 GW. Segundo EPIA (2014), o aumento na geração FV no país foi impulsionado pela necessidade de incentivar o investimento em energia renovável. Após o terremoto e o tsunami que atingiram a usina nuclear de Fukushima, em março 2011, o país passou a apostar em novas fontes de energia, capazes de superar a crise nuclear. O apoio do governo japonês para a implementação destes sistemas é cerca de três vezes maior do que o oferecido pela Alemanha ou pela China.

As implantações de novas instalações de sistemas fotovoltaicos ocorreram principalmente fora da Europa, sendo 27 GW em 2013, 3,9 GW em 2012, 8 GW em 2011 e 3 GW em 2010. A Alemanha manteve o papel de liderança no mercado global de geração de energia fotovoltaica em 2013, mas perdeu em novas instalações. O país detém 26% do mercado global e é responsável por 30% da energia solar produzida na Europa, 35,9 GW da

capacidade instalada no continente. Em 2013 a rede elétrica alemã recebeu aporte de 3,3 GW com a instalação de sistemas recém conectados. Atualmente, é o país mais desenvolvido neste setor em nível global, de toda a energia consumida pelos alemães, 5,5% é proveniente do sol. A Alemanha apresentou em 2013 uma diminuição de 57% em novas instalações FV em relação ao ano de 2012 (EPIA, 2014).

A Itália é responsável por 13% da produção da energia solar mundial. No total, a capacidade acumulada é de 17,6 GW. O país é o segundo do continente Europeu em desenvolvimento deste tipo de energia e possui 1,5 GW de potência instalada em 2013 (EPIA, 2014).

2.4 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

No Brasil, a utilização de sistemas fotovoltaicos está em estágio inicial de desenvolvimento. Contudo, o país possui muito mais disponibilidade de irradiância solar, o que é fundamental para a geração da energia fotovoltaica, do que nos países líderes de geração. Esse fato, aliado ao aumento do preço da energia convencional e aos incentivos governamentais, tende a impulsionar a utilização desse tipo de geração no país.

Ao longo dos anos foram sendo criadas políticas e programas de incentivos que impulsionam a geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. Esses programas têm como objetivo incentivar a geração fotovoltaica de modo a atingir a escala necessária para competir com outras fontes de geração de energia.

A resolução 687 da ANEEL, publicada em novembro de 2015, fornece as condições gerais para o acesso da micro-geração (até 75 kW) e da mini-geração (de 75 kW a 5 MW) à rede de distribuição. A 687 considera as fontes hidro, solar, eólica, biomassa ou cogeração como fontes de eletricidade para alimentar a rede. Desta forma, qualquer pessoa pode instalar um sistema gerador e usufruir de sua própria energia, interligando o seu sistema na rede da concessionária local. Com tais iniciativas, um cenário otimista para unidades FV conectadas à rede no Brasil parece finalmente se tornar realidade.

Em dezembro de 2013 foi lançado o *Projeto 50 Telhados* com o intuito de divulgar a geração distribuída a partir da fonte fotovoltaica. Coordenado pelo Instituto Ideal, o objetivo é instalar 50 telhados fotovoltaicos de 2 kWp (ou 100 kWp de potência total instalada), com isso a geração anual estimada ficaria em torno de 130 MWh em cada cidade onde serão instalados. O esperado era implementar o projeto em pelo menos 20 cidades brasileiras durante o ano de 2014. No final de 2014, o projeto somava 32 cidades. Essas

idades se tornarão referência nacional na utilização de energia oriunda do sol, matéria-prima livre e inesgotável. Com tal ação, entre os anos 2014 e 2015 o Brasil terá instalado o equivalente ao projeto alemão “1000 telhados”, responsável por impulsionar a energia solar fotovoltaica na Alemanha. Contudo, no caso brasileiro, isso seria alcançado sem qualquer tipo de incentivo nas tarifas de energia elétrica vigentes (AMÉRICA DO SOL, 2015a).

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL (2015), operam no país 317 usinas, totalizando uma potência instalada de 19.178,68 kW.

Segundo Ruther (2010), a usina hidrelétrica de Itaipu produz menos de 25 % da energia elétrica consumida no Brasil. O lago de Itaipu cobre uma superfície de 1350 km², com uma potência instalada de 14 GW e uma produção anual de energia elétrica em torno de 80 a 90 TWh/ano. Cobrindo o lago de Itaipu com gerador solar fotovoltaico, com 8% de eficiência global e assumindo a irradiação solar da região do lago, 1350 km² de módulos FV teriam 108 GWp de potência e uma produção anual de energia elétrica de 183 TWh/ano, isso equivale aproximadamente a 50% da energia elétrica consumida no Brasil.

Neste sentido a Eletrosul com o objetivo de incentivar o desenvolvimento da energia solar na América Latina, lançou o primeiro projeto conectado à rede de grande porte a ser implantado em prédio público brasileiro, o projeto Megawatt Solar, que consiste na implantação de uma usina fotovoltaica integrada ao seu edifício sede, utilizando a área do telhado e dos estacionamentos adjacentes, sendo conectado à rede da distribuidora de energia elétrica local, para fins de comercialização. A usina solar tem a capacidade instalada de aproximadamente 1 MWp (megawatt pico), energia suficiente para atender o consumo anual de 540 residências.

Na sequência são apresentados, como exemplos, alguns dos SFCR construídos no Brasil.

Entre os projetos já concretizados pode-se mencionar a Unidade Fotovoltaica - UFV Tauá (CE), foi a primeira UFV implantada no Brasil, sendo um empreendimento privado, da empresa EPX. Tem potência instalada de 1 MWp, em 4.680 módulos de p-Si de 215Wp, conta com 9 inversores de 100kWp e injeta a energia na rede de 13,8 kV da Coelce (Companhia Energética do Ceará), o suficiente para abastecer 1.500 residências. De acordo com a EPX, a meta é chegar a 50MW. (MAIA, 2012)

O projeto estádios solares transformou alguns dos estádios que receberam jogos da copa de 2014 em pequenas usinas de energia.

Em Salvador (BA), o estádio Governador Roberto Santos, mais conhecido como estádio de Pituaçu é o primeiro estádio da América Latina com energia solar, característica

que posteriormente se tornou parâmetro para os estádios da Copa do Mundo de 2014. O Sistema Solar Fotovoltaico tem capacidade de geração de 630 MWh ao ano, capaz de abastecer 525 residências, e utiliza módulos flexíveis de filmes finos de silício amorfo, gera energia suficiente para suprir toda a demanda própria. A produção excedente que é de 270 MWh é utilizada para compensar o consumo da sede da Secretaria Estadual do Trabalho, Emprego, Renda e Esporte (Setre). A instalação do novo sistema proporcionou uma economia de cerca de R\$ 120 mil por ano ao governo da Bahia (SECOM, 2012).

O estádio Governador Magalhães Pinto, ou simplesmente Mineirão, em Belo Horizonte (MG), foi o primeiro estádio com certificação *LEED Platinum* de sustentabilidade a utilizar energia solar em uma partida da maior competição de futebol do planeta. Tem uma potência instalada de 1,42 MWp, com 5.910 módulos FV, com potência de 240 Wp cada um, o que equivale ao consumo médio de cerca de 1200 residências. A energia gerada será de 1.825 MWh por ano (IMPrensa Oficial, 2014).

Um dos grandes símbolos do futebol brasileiro, o estádio municipal do Maracanã, no Rio de Janeiro, instalou placas sobre uma superfície de 2.380 mil metros quadrados, a usina tem uma potência de 400 kWp, que serão capazes de gerar 529 MWh por ano, o suficiente para abastecer 240 residências. Com isso, cerca de 2.500 toneladas de CO₂ serão evitadas com o sistema (AMÉRICA DO SOL, 2015b).

A Usina Solar Fotovoltaica São Lourenço da Mata foi construída com o objetivo de fornecer energia à Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) e é responsável por até 30% do consumo pela Itaipava Arena Pernambuco. A usina foi instalada numa área de 15 mil m² e tem 1 MWp de potência, capacidade suficiente para gerar 1.500 MWh por ano, o que equivale ao consumo de seis mil habitantes (DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2014).

A maior usina de energia solar do Brasil, está localizada na cidade Azul, em Tubarão, no sul de Santa Catarina, tem 19.424 painéis solares. Inaugurada em 9 de agosto de 2014, trata-se da maior usina solar do país em potência, são 3 Megawatts instalados, o suficiente para abastecer em média 2.500 casas. É praticamente um quarto de toda a energia solar produzida no Brasil.

3 SEGUIDORES SOLARES

Neste capítulo são descritos os conceitos sobre os seguidores solares e como eles são classificados.

Este capítulo também descreve o estado da arte dos seguidores solares, onde são relacionados trabalhos sobre a aplicação destes sistemas.

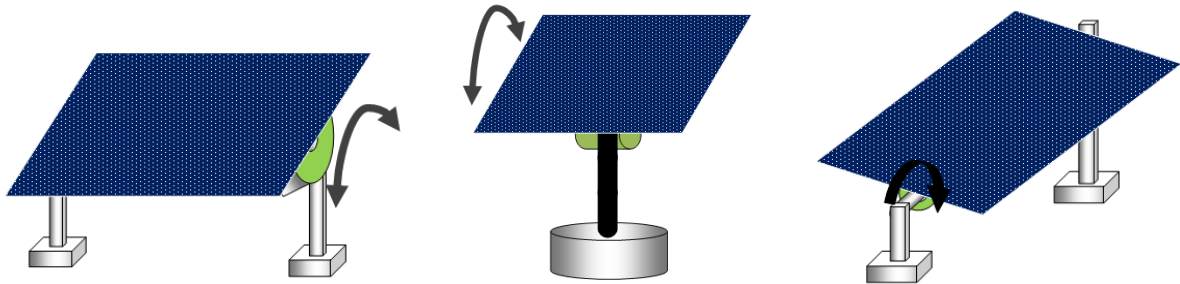
3.1 Classificação dos seguidores solares

Os movimentos diurnos e sazonais da Terra afetam a intensidade da irradiação sobre os sistemas fotovoltaicos (FV). Nesse contexto os dispositivos mecânicos denominados de seguidores solares e também conhecidos como rastreadores solares, têm como objetivo manter os sistemas FV sempre voltados para o Sol, em posição perpendicular aos raios solares. Deste modo, o rendimento do sistema aumenta devido à maior incidência da componente de energia direta.

Existem diversos tipos de seguidores solares. Eles são aplicados conforme o local de instalação do sistema FV e os custos variam de acordo com a complexidade, funções e estratégias do acompanhamento do Sol. De acordo com Pinto *et al.* (2010), os seguidores são classificados quanto ao número de eixos rotativos, a estratégia de rastreamento, tipo de estrutura utilizada e tipo de controle.

Os sistemas que utilizam seguidores solares de um eixo podem ser posicionados horizontalmente, verticalmente ou inclinados e sua orientação pode ser no sentido Norte-Sul ou Leste-Oeste. Esses rastreadores apresentam um menor custo, são mais simples quanto à mecânica e ao controle, porém, tem uma menor eficiência, devido o rastreamento ser realizado em apenas um sentido. A eficiência desse tipo de configuração de um eixo é semelhante as demais configurações em regiões equatoriais, onde a incidência de irradiação não varia significativamente com o movimento Norte-Sul da Terra. A Figura 3.1 apresenta as configurações do posicionamento horizontal, vertical e inclinado.

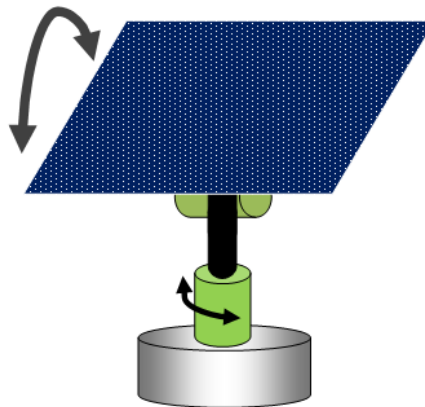
Figura 3.1 - Seguidores solares de um eixo



Fonte: Autor.

Os seguidores de dois eixos possuem um eixo responsável pelo acompanhamento da trajetória diária do Sol, sentido Leste-Oeste (ângulo zenital), e outro que ajusta a sua inclinação, sentido Norte-Sul (ângulo azimutal). Desta forma, o rastreador solar consegue captar mais a luz solar, aumentando a eficiência do painel FV. Esse arranjo de eixos é mais complexo com relação à mecânica e ao controle de posição, além de apresentarem maior custo, embora sejam mais eficientes. Pelo fato de haver movimentação em dois sentidos, para o uso deste tipo de rastreador é necessária maior área de terreno. Um exemplo de seguidor de dois eixos pode ser observado na Figura 3.2.

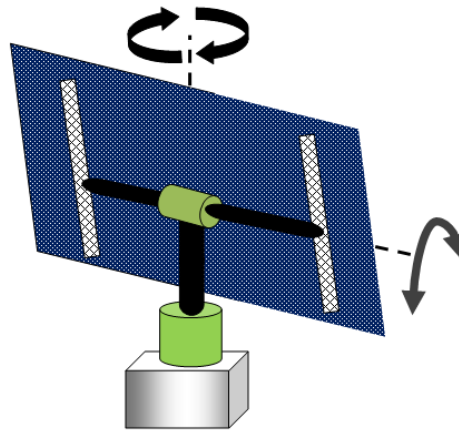
Figura 3.2 - Seguidor solar de dois eixos



Fonte: Autor.

O seguidor do tipo pedestal é a estrutura mais simples. Consiste em um eixo posicionado na vertical, que gira a fim de dar movimento à estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos. A rotação é efetuada pela utilização de uma caixa de engrenagens. Devido aos esforços mecânicos causados pelo vento necessitam de uma fundação que pode ser fixado ao solo sobre uma base concretada, conforme ilustrado na Figura 3.3.

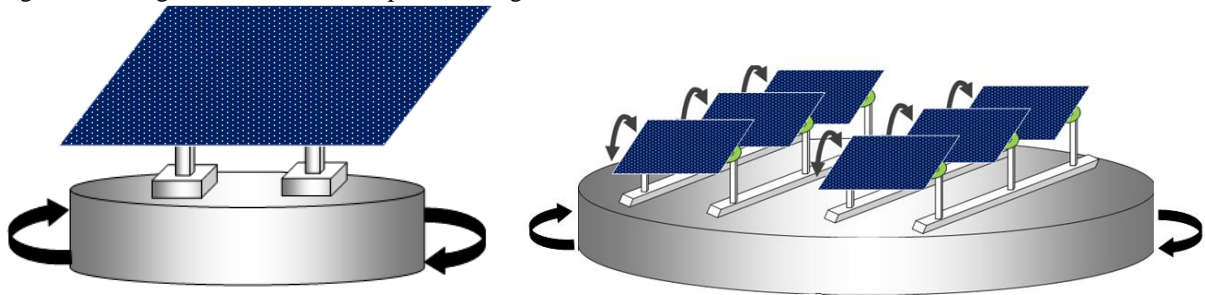
Figura 3.3- Seguidor solar de dois eixos com pedestal



Fonte: Autor.

A estrutura de seguidores solares com plataforma giratória geralmente é utilizada em sistemas de grande porte, como concentradores solares, suportes de grandes arranjos de painéis FV ou compostos de muitos módulos solares. Essa estrutura é caracterizada pelo formato de sua base circular que movimenta o eixo horizontal. Na Figura 3.4 são ilustradas as configurações da plataforma giratória com um e vários painéis FV.

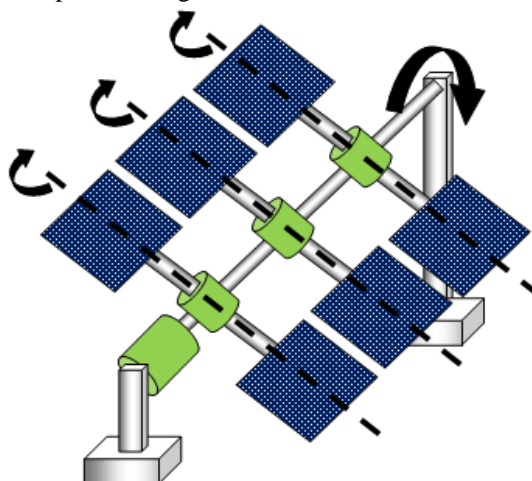
Figura 3.4 - Seguidores solares com plataforma giratória



Fonte: Autor.

O seguidor solar com estrutura *roll-tilt*, orienta um conjunto de painéis FV, como é visto na Figura 3.5. Este dispositivo movimenta o arranjo na direção norte-sul, e separadamente em cada painel há o controle na direção leste-oeste. Esses rastreadores apresentam complexidade de implementação em relação à parte mecânica, pois existem muitos acoplamentos mecânicos e partes giratórias. Necessita de uma fundação menor em relação ao tipo pedestal.

Figura 3.5 - Seguidores solares com plataforma giratória



Fonte: Autor.

Os seguidores solares são denominados passivos quando não possuem sistema de controle eletrônico. O princípio de funcionamento do seguidor passivo é baseado na atuação da força da gravidade em dois cilindros existentes nas extremidades leste e oeste da montagem do coletor solar, ou seja, faz uso do efeito da transferência de massa (peso) de um lado do rastreador para o outro para acompanhar o Sol. Na Figura 3.6 é mostrado um seguidor solar passivo.

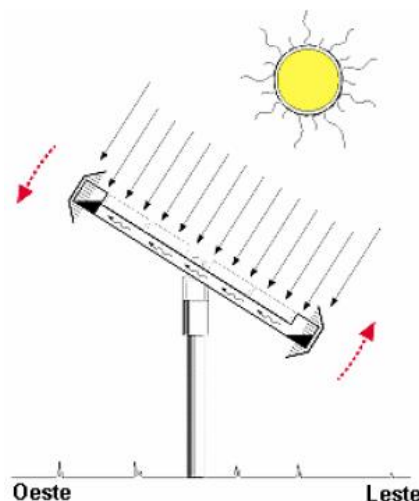
Os cilindros ficam montados estruturas de sombreamento adequadas que são conectados por um tubo e preenchidos com um fluido, em geral o Freon, submetido à certa pressão, permitindo a passagem do líquido de um lado para o outro. Quando a luz do Sol bate em um dos cilindros e os raios não estão incidindo a um ângulo de 90° no módulo, o líquido nele aquece, aumentando sua pressão e forçando-o a se deslocar para o outro cilindro, causando um deslocamento do centro de massa da montagem, resultando no giro da mesma. Desta forma, o painel solar segue o movimento aparente do Sol.

Este tipo de rastreador é mais eficiente quando trabalha a altas temperaturas. Duas de suas desvantagens são o distúrbio que podem sofrer com a força do vento e a falta parcial de radiação solar, como em dias nublados ou quando o Sol nasce, onde o módulo está virado para o oeste, acarretando uma diminuição na energia captada diariamente. Seu retorno é forçado pelo aquecimento do tubo do lado oeste, pois quando o Sol nasce sua luz atinge apenas este tubo devido à construção mecânica.

Como o sistema utiliza apenas o efeito do aquecimento solar, não é necessária qualquer alimentação adicional de energia. É um rastreador geralmente simples e confiável, porém bastante dependente de fatores ambientais como a temperatura. Seu funcionamento limita-se a seguir o Sol em seu movimento Leste-Oeste ao longo do dia, sem responder aos

deslocamentos anuais na direção Norte-Sul. Também possui uma resposta relativamente lenta, sendo que sua precisão não é adequada para o uso com concentradores (POULEK; LIBRA, 1998 apud VÉRAS, 2004).

Figura 3.6 - Seguidor passivo



Fonte: Oliveira, 2007.

Os seguidores solares são denominados ativos quando possuem sistema de controle eletrônico/digital de posição. Esses rastreadores podem possuir sensores dos seguintes tipos: luminosidade, fim de curso e piriômetro. No sistema de tração podem ser empregados como atuadores, motores de passo, motores de corrente contínua ou motores de indução.

Seguidores solares eletro-óptico utilizam sensores ópticos como fototransistor, fotodiodo, LDR (resistores dependentes de luz), e células fotovoltaicas para detectar a posição do Sol. O deslocamento é feito quando as informações obtidas pelos sensores são enviadas ao circuito de controle acionando um motor CC, alimentado pelo próprio painel FV. Esse tipo de seguimento apresenta bons resultados em dias com condições climáticas favoráveis e desvantagem em dias nublados, pois na falta de luminosidade suficiente, o sistema pode não se posicionar corretamente.

Rastreadores solares controlados por microprocessadores operam baseados em um algoritmo que calcula a posição do Sol e controla a atuação dos motores para posicionar a estrutura de conversão em direção ao Sol. Nestes seguidores, a posição exata do Sol é calculada através de software e não necessitam do uso de sensores.

O seguidor do tipo ativo possui um sistema de controle que consiste em sensores de luz (LDR), controlador e atuador (um ou mais motores elétricos). O controlador, que pode ser um circuito elétrico com ou sem microcontrolador, processa os sinais vindos dos sensores,

e de acordo com a lógica de controle ou de programação (no caso do circuito com microcontrolador), envia o sinal para o atuador, que geralmente é um motor elétrico de corrente contínua. O microprocessador controla a movimentação do arranjo, mantendo-o alinhado com o Sol.

Seguidores ativos microcontrolados sofrem menor influência das condições meteorológicas e podem oferecer boa precisão. Contudo, são um sistema de maior complexidade, que envolve o uso de componentes eletrônicos, motores elétricos e, frequentemente, baterias, apresentando uma confiabilidade inferior aos seguidores passivos.

A energia utilizada para mover o módulo através do motor elétrico pode ser a gerada pelo módulo. Um dos problemas deste tipo de rastreador é o retorno à posição inicial do dia, com a face do módulo virada para o leste, pois no final do dia, obviamente, o módulo não mais está recebendo energia do Sol para ligar o motor no sentido contrário. Uma das alternativas é o uso de baterias recarregáveis, assim durante o dia a bateria é carregada e no fim do dia o motor utiliza a energia para retornar o módulo. Outra alternativa, proposta por Poulek e Libra (1998 apud VÉRAS, 2004), é o uso de um módulo extra ligado diretamente no motor elétrico, fixado perpendicularmente ao módulo coletor da energia solar, inclinado 20° a leste. Assim, quando o Sol nasce, sua luz incide neste módulo extra, gerando energia suficiente para ligar o motor e girar a montagem para o leste no início do dia.

Os seguidores solares ativos podem realizar o acompanhamento do Sol em um ou em dois eixos. Na Figura 3.7 (a) é observado um exemplo de seguidor ativo com acompanhamento em um eixo e o seguidor de dois eixos é mostrado na Figura 3.7 (b).

Figura 3.7 - (a) Seguidor ativo de um eixo e (b) Seguidor ativo de dois eixos com concentrador



Fonte: Oliveira, 2007.

Segundo Pinto *et al.* (2010), a estratégia de rastreamento da luz solar depende do número de eixos existentes no painel. Para sistemas de um eixo, existe o rastreamento polar, azimutal e horizontal. Já para os sistemas de dois eixos, há duas possibilidades de rastreamento, polar equatorial e azimutal/elevação.

Na estratégia de rastreamento polar, a estrutura de fixação dos módulos FV é posicionada sobre um eixo inclinado (sentido norte-sul), com ângulo de inclinação fixo, que depende da latitude do local da instalação. O seguimento é realizado no sentido leste-oeste. Esse seguidor apresenta bom desempenho em regiões onde a latitude está próxima da linha do equador.

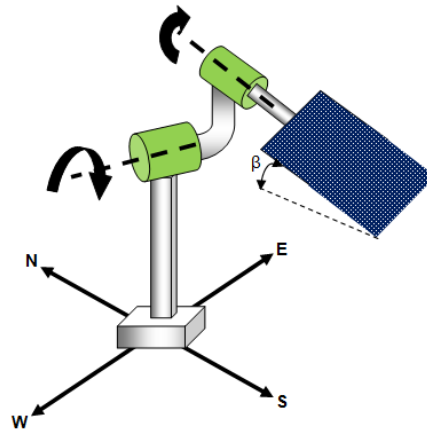
Os rastreadores solares do tipo azimutal possuem um eixo vertical que suporta a estrutura de fixação de módulos e orientam o movimento da estrutura de fixação no sentido leste-oeste, ajustando o ângulo de azimute. Esses rastreadores possuem um eixo com orientação no sentido norte-sul para ajuste de inclinação. A inclinação pode ser ajustada automaticamente, manualmente ou também pode ser fixa. Esse tipo de estratégia tem um bom desempenho em latitudes e estações do ano onde os dias são longos.

Os rastreadores solares de eixo horizontal operam orientando a estrutura de conversão no sentido leste-oeste, seguindo a trajetória do Sol diariamente. Esses rastreadores são instalados com ângulo de inclinação de 0° em relação ao solo, não possuindo ajuste do ângulo de inclinação e são utilizados no tracionamento de sistemas que possuem muitos módulos FV, onde um único motor movimenta toda a estrutura mecânica.

O seguidor polar equatorial permite máxima absorção de energia possível, porém a um custo mais elevado em relação às outras configurações e necessita de uma área relativamente grande devido ao sombreamento dos seguidores adjacentes. Nesse tipo de estrutura, um eixo é inclinado de acordo com a latitude local, e o ângulo de seguimento acompanha o ângulo horário. O outro eixo gira junto com o ângulo de declinação solar (PINTO, et. al, 2010). A Figura 3.8 ilustra o posicionamento do seguidor polar equatorial.

Os seguidores solares azimutal/elevação utilizam rastreamento nos dois eixos, e possuem características bastante semelhantes ao rastreador polar equatorial. A principal diferença entre as duas configurações é que o eixo de rotação no sentido leste-oeste é o eixo vertical, permitindo coletar o máximo de energia possível, embora ocupe uma área maior de terreno para não causar sombreamento nas adjacências.

Figura 3.8 - Seguidor solar polar equatorial



Fonte: Adaptado de Pinto *et al.* (2010).

3.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

De acordo com Nagahara (2009), o número de módulos fotovoltaicos pode ser calculado através da Equação 3.1

$$N_{fv} = \frac{\left(\frac{W_c}{V_s \cdot \eta_{fv} \cdot F_p} \right) + \left(\frac{2 \cdot W_c \cdot A}{V_s} \right)}{I_d \cdot I_{fv}} \quad (3.1)$$

Em que,

| | |
|-------------|-------------------------------------|
| N_{fv} | Número de painéis fotovoltaicos |
| W_c | Energia diária consumida (W.h) |
| V_s | Tensão do sistema (V) |
| η_{fv} | Rendimento do painel fotovoltaico |
| F_p | Fator de perdas |
| A | Autonomia do sistema (dia) |
| I_d | Insolação diária (horas) |
| I_{fv} | Corrente do painel fotovoltaico (A) |

3.3 Estado da arte dos seguidores solares

Diversos trabalhos sobre seguidores solares têm sido publicados nos últimos anos Oliveira (2007) construiu um modelo de rastreador solar com seguimento em uma direção. O rastreador foi montado em Recife, região próxima ao equador. Os movimentos dos painéis ao

longo do dia ocorrem através de sensores de alinhamento, são utilizados dois LDR's, para o movimento Leste-Oeste, enquanto um segundo circuito eletrônico controla o retorno do painel para a posição inicial (a nascente). Foram verificados ganhos na energia diária coletada variando entre 15%, para um dia nublado, e 31% para um dia de céu limpo. O rastreador avaliado apresentou um custo equivalente a cerca de 34% do custo de um rastreador comercialmente disponível, entretanto com desempenho semelhante.

Na cidade de Teerã que fica localizada na república do Irã, Mousazadeh et *al.* (2009), descreveram diferentes tipos de sistemas de seguimento solar discutindo os prós e contras de cada sistema. Segundo os autores, o uso de seguidor solar não é essencial, mas a sua utilização pode aumentar a energia coletada de 10 a 100% em diferentes períodos de tempo e condições geográficas. No entanto, não é recomendado o uso de sistema de seguidores por pequenos painéis solares devido as grandes perdas de energia nos sistemas de condução. Ainda verificou-se o acréscimo de 2% a 3% do consumo de energia, quando utilizado os seguidores solares, isto porque tais sistemas utilizam diversos componentes eletromecânicos para o seu funcionamento e que o dispositivo de sol-rastreamento mais eficiente e popular foi encontrado para ser sob a forma de eixo polar e tipos de azimute / elevação.

Na cidade de Van na Turquia, Rustemli, Dincadam e Demirtas (2010) compararam um dispositivo de rastreamento solar de um eixo com um fixo. Os resultados mostraram que o dispositivo de rastreamento aumentou a produtividade em 29% em relação ao fixo.

Gomez-Gil, Wang e Barnett (2011) compararam quatro configurações de sistemas FV de placa plana, um fixo, um seguidor solar de 1 eixo, um de 2 eixos e um concentrador FV. A comparação foi baseada em dados reais de sistemas FV instalados na Espanha em 2009. Os dados indicam que o concentrador FV, o seguidor de 1 eixo e o de 2 eixos tiveram ganhos anuais de 14,3%, 33,5% e 37,9%, respectivamente.

Huang, Ding e Huang (2011), projetaram um sistema FV de acompanhamento do Sol de um eixo em três posições. Os resultados foram comparados a um painel FV fixo. Os painéis FV foram instalados na cidade Taipé em Taiwan Para um determinado dia nublado o sistema de seguimento pode gerar 35,8% mais eletricidade do que o painel fixo, e 35,6% em um dia claro.

Mohammad e Karim (2012) apresentaram um sistema de seguimento solar automático híbrido de dois eixos instalado na cidade de Chittagong em Bangladexe. Foi realizada uma comparação utilizando os sistemas seguidor híbrido, seguidor com um eixo,

seguidor com dois eixos e um módulo fixo. Os resultados mostraram que o uso do sistema de dois eixos produziu ganho de 18% da produção de energia, em comparação com o de um eixo. O ganho de potência de saída do seguidor de dois eixos foi mais elevado 54% quando comparado com um sistema fixo inclinado $23,5^\circ$ com a horizontal.

Barker, Neber e Lee (2013) propuseram um rastreador de baixo perfil composto por dois co-planares e atuadores lineares perpendiculares juntamente com uma única ligação de braço e pivôs. Um protótipo foi construído na cidade de Santa Clara nos Estados Unidos e a capacidade de seguimento foi demonstrada medindo a temperatura do receptor a partir de um espelho côncavo. A simulação é executada de forma a coincidir com o solstício de inverno, quando o Sol está mais baixo no céu, e as sombras são maiores. Os resultados das simulações indicam que o perfil do rastreador proposto tem uma área sombreada ligeiramente menor do que os rastreadores de estilo mastro.

No Egito Montasser (2014) desenvolveu o protótipo de um sistema de rastreamento solar de dois graus de liberdade, utilizando um microcontrolador Arduino, dois servos motores e quatro LDR's empregados para detectar continuamente a intensidade dos raios solares em quatro posições isoladas. Foi projetado e construído um programa de software de controle de *feedback*, permitindo que o seguidor solar compense automaticamente a mudança do Sol para melhorar a eficiência das células FV. Os resultados mostram que o uso experimental do sistema de rastreamento aumenta os ganhos em 38% em comparação com um coletor fixo.

Na cidade de Harbin na China, Yao *et al.* (2014) propõem um seguidor solar multiuso de duplo eixo, denominado declinação-relógio. Neste sistema de montagem, a estratégia de rastreamento normal e estratégia de ajuste diário são desenvolvidos para sistemas FV planos e sistemas de concentração de energia solar (CSP), respectivamente. A eficiência energética média obtida no FV com seguidor e estratégia de rastreamento normal, em comparação com o FV fixo, é superior a 23,6% e a eficiência energética média com estratégia de ajuste diário foi superior 31,8%. Os resultados da experiência mostram que as duas estratégias de rastreamento são viáveis para o rastreador desenvolvido.

Maia, Ferreira e Hanriot (2014) desenvolveram um modelo matemático para estimar a radiação solar absorvida, o ganho de energia útil, e a eficiência de seis coletores solares de placa plana no Brasil. Os resultados obtidos pelos coletores solares de placa plana com rastreamento foram comparados com um dispositivo fixo. O rastreamento do sistema com rotação em torno de dois eixos apresentou maior energia absorvida, quando comparada com os sistemas de rotação sobre um único eixo, assim como o sistema do coletor fixo. Além

disso, foi demonstrado que o ângulo de inclinação para um coletor solar fixo não causa variações significativas no ganho de energia útil ou na radiação solar absorvida, com o mesmo ângulo de azimute, ou seja, o ângulo de inclinação não apresentou uma influência significativa sobre os parâmetros estudados, indicando que não é economicamente viável alterar a inclinação dos coletores.

A Tabela 3.1 fornece um resumo de alguns dos sistemas com seguidores que foram abordados nesse estado da arte. Para seguidores com um eixo foram observados ganhos de energia elétrica que variam de 14,3% a 31% em relação ao painel fixo. Na Figura 3.9 são vistas as localizações geográficas dos locais de implantação dos seguidores citados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Exemplos de sistemas com seguidores solares instalados no mundo

| Ano | Local | Tipo de seguidor | Ganhos |
|------|------------|---------------------------------------|--|
| 2007 | Recife | Um eixo | 31% |
| 2010 | Turquia | Um eixo | 29% |
| 2011 | Espanha | Um eixo, dois eixos e concentrador FV | 14,3%, 33,5% e 37,9%, respectivamente |
| 2011 | Taiwan | Um eixo com três posições | 35,85 % dia nublado e 35,6% dia claro |
| 2012 | Bangladesh | Dois eixos | 54% |
| 2014 | Egito | Dois eixos | 38% |
| 2014 | China | Dois eixos | 23,6% |

Fonte: Autor.

Figura 3.9 - Seguidor solar polar equatorial



Fonte: Adaptado de Pena (2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a infraestrutura do Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará, enfatizando os equipamentos utilizados na pesquisa. São descritos os aspectos eletromecânicos, esquema de controle, monitoramento e aquisição de dados e finalmente a metodologia do funcionamento em malha aberta, em malha fechada e em três posições do seguidor solar proposto. Também é descrito o critério adotado para análise financeira dos sistemas com seguidor solar em relação ao painel fixo.

4.1 Laboratório de Energias Alternativas

O Laboratório de Energias Alternativas – LEA (Figura 4.1) está localizado no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana – NEPAU (Figura 4.2), que desenvolve pesquisas voltadas ao cultivo de hortaliças, plantas medicinais, ornamentais, produção de mudas para arborização urbana, pomar doméstico e comunitário, nas zonas urbanas e peri-urbanas das cidades. De acordo com Moreira (2011), a escolha para a instalação do LEA, assim como a integração das ações junto ao Centro de Tecnologia e de Ciências Agrárias, foi baseada em duas premissas: energia e agricultura sustentável.

Figura 4.1 - Laboratório de Energias Alternativas – LEA

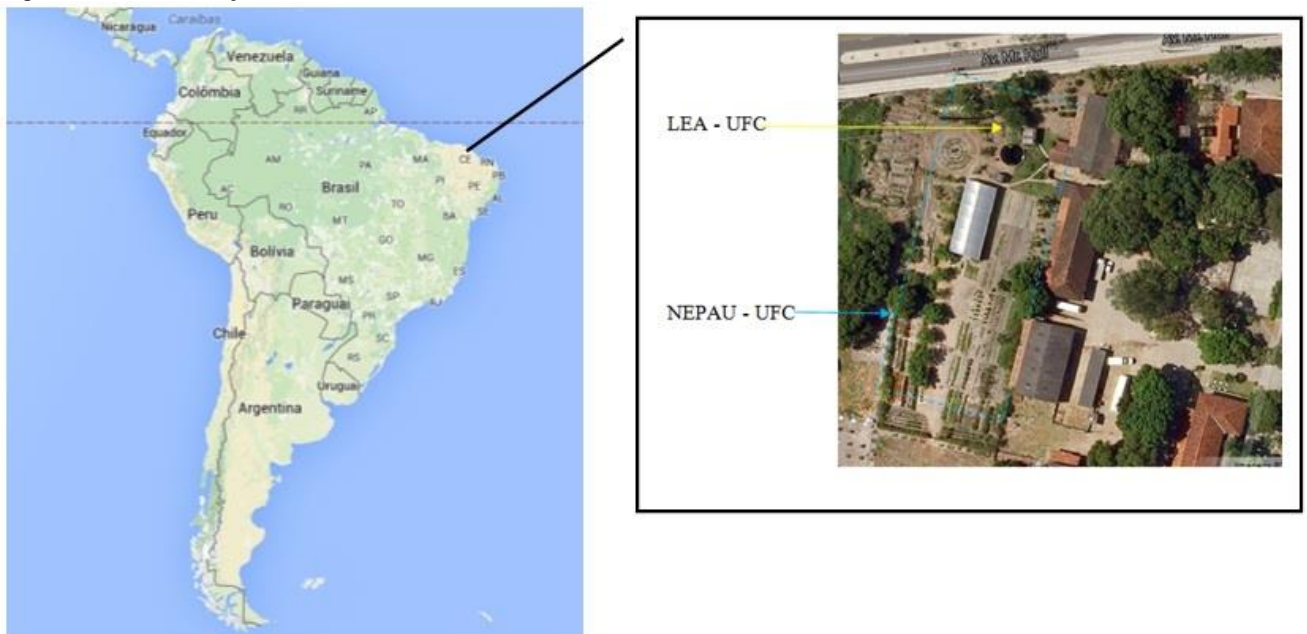


Fonte: Autor.

No LEA são desenvolvidas pesquisas em energias alternativas renováveis nas áreas fotovoltaicas, eólica e biomassa. A potencialidade de pesquisa do LEA não fica apenas na área de energias alternativas. Com característica multidisciplinar, o LEA permite ainda realizar atividades práticas de controle e automação, eletroeletrônica e mecânica.

O LEA conta com equipamentos eletroeletrônicos modernos como controlador lógico programável (CLP), sensores de vazão, temperatura, pressão, irradiação solar, painéis fotovoltaicos (FV), banco de baterias, bombas hidráulicas, válvulas *on-off* e proporcional, biodigestor tubular, conjunto motogerador e um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Figura 4.2 – Localização do LEA – UFC



Fonte: Imagem do *Google Maps*.

Como a referida pesquisa está relacionada à energia solar fotovoltaica, apenas serão detalhados os equipamentos utilizados na coleta, armazenamento e utilização da energia solar.

4.2 Painéis Fotovoltaicos

O LEA dispõe de oito painéis FV do fabricante Kyocera modelo KC 85T (Figura 4.3), no entanto, na pesquisa foram utilizados somente dois painéis. As características físicas e elétricas dos painéis podem ser observadas na Tabela 4.1.

Figura 4.3 - Paineis FV Kyocera 85T - LEA-UFC



Fonte: Moreira (2011).

Tabela 4.1 – Características Físicas e elétricas do Painel Kyocera 85T

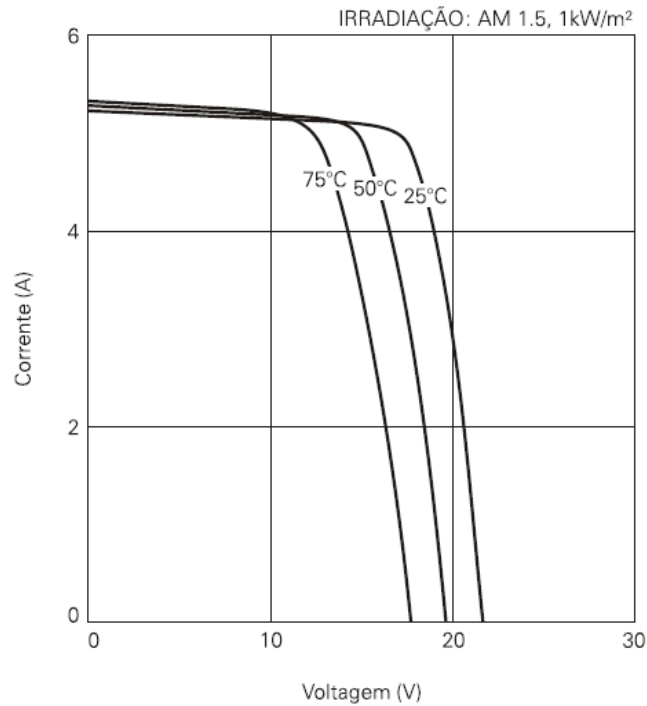
| Descrição | Valor |
|--|---|
| Máxima potência | 87 Watts |
| Tolerância | +10% / -5% |
| Tensão de máxima potência | 17,4 Volts |
| Corrente de máxima potência | 5,02 Amps |
| Tensão de circuito aberto | 21,7 Volts |
| Corrente de curto-circuito | 5,34 Amps |
| Altura | 1007 mm |
| Largura | 652 mm |
| Peso | 8,3 Kg |
| Temperatura nominal de operação | 47°C |
| Icc Coeficiente de temperatura da corrente | $(2,12 \times 10^{-3}) \text{ V}/^\circ\text{C}$ |
| Vca Coeficiente de temperatura da tensão | $(-8,21 \times 10^{-2}) \text{ V}/^\circ\text{C}$ |

Fonte: Kyocera (2013).

Nota: As especificações Elétricas estão sob condições de teste de irradiância de $1 \text{ kW}/\text{m}^2$. Espectro de 1,5 de massa de ar e temperatura de célula de 25°C .

Na Figura 4.4 são vistas as características de tensão e corrente da célula nas temperaturas de trabalho de 25°C , 50°C e 75°C , exposta a uma irradiância de $1 \text{ kW}/\text{m}^2$.

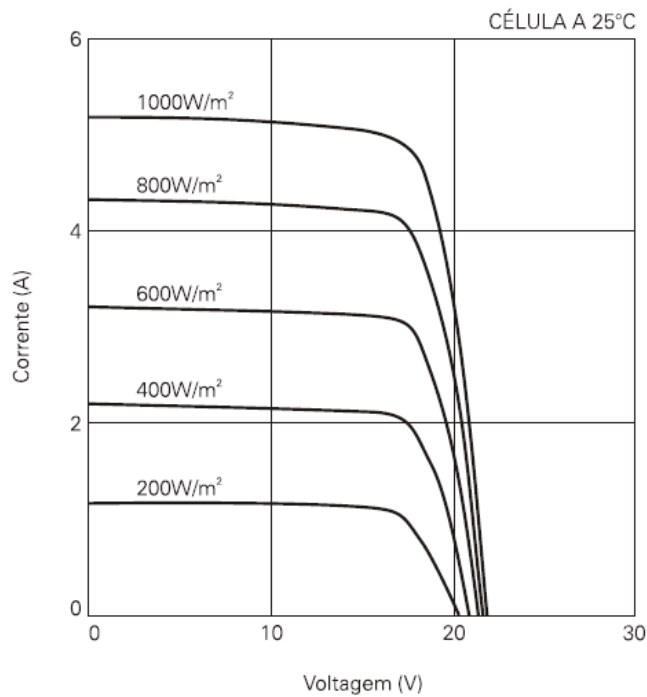
Figura 4.4 - Características de tensão e corrente da célula em relação à temperatura



Fonte: Kyocera (2013).

Na Figura 4.5 podem ser observadas características de tensão e corrente da célula quando exposta à irradiância de 200 W/m², 400 W/m², 600 W/m², 800 W/m² e 1000 W/m².

Figura 4.5 - Características de tensão e corrente da célula em relação à irradiância solar



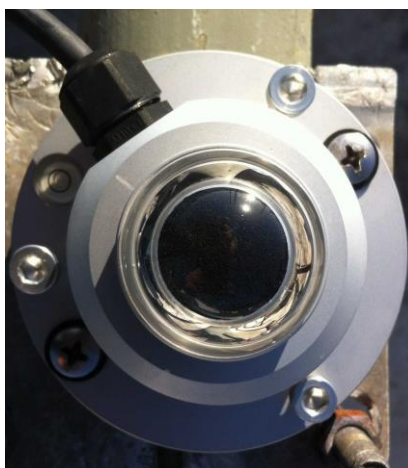
Fonte: Kyocera (2013).

4.3 Piranômetro

De acordo com Naziazeno (2009), os piranômetros são radiômetros que medem a potência por unidade de área da irradiância global, ou seja, são instrumentos que medem a soma das componentes difusa e direta.

No LEA está instalado o piranômetro LP 02 do fabricante Hukseflux, que mede a irradiância solar recebida por uma superfície plana em um ângulo de 180° de campo de visão. Trata-se de um piranômetro de segunda classe que monitora a irradiância solar para a faixa de espectro solar total. O LP 02 está em conformidade com o manual da *World Meteorological Organization* (WMO) e a ISO 9060. Na Figura 4.6 pode ser visto o piranômetro instalado no teto do LEA e na Tabela 4.2 as características do modelo LP 02 da Hukseflux.

Figura 4.6 - Piranômetro do LEA



Fonte: Autor.

Tabela 4.2 - características do modelo LP 02 Hukseflux

| Descrição | Valor |
|--|---------------------------------|
| Tempo de resposta (95%) | 18 segundos |
| Deslocamento de origem devido a 200 W/m ² de radiação térmica | < 15 Wm ⁻² |
| Deslocamento de origem, devido à mudança de temperatura de 5 °K/hr | < ± 4 Wm ⁻² |
| Não estabilidade (variação %/ano) | < ± 1% |
| Não linearidade (100 a 1000 W/m ²) | < ± 1% |
| Dependência da temperatura de sensibilidade | ± 5% (-10° a + 40°C) |
| Resposta de inclinação (0 a 90° at 1000 W/m ²) | < ± 2% |
| Precisão esperada para somas diárias | ± 10% |
| Faixa espectral (20 %, Continua | 285 a 3000 x 10 ⁻⁹ m |

Tabela 4.2 - características do modelo LP 02 Hukseflux

| | |
|--|---|
| Sensibilidade (nominal) | $15 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ |
| Saída de sinal esperado sob radiação solar natural | -0.1 a + 50 $\times 10^{-3} \text{ V}$ |
| Impedância | 30 a 100 (Ω) |
| Temperatura de operação | -40° a +80°C |
| Faixa de medição | 0 a 2000 W/m^2 |
| Faixa de resistência do sensor | 40 a 60 Ω |
| Classe de proteção IP | IP 67 |

Fonte: Hukseflux (2010).

4.4 Controlador Lógico Programável (CLP)

O CLP é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementações específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos (ZANCAN, 2011).

O LEA utiliza, para efetuar o controle dos sistemas, o CLP Twido TWDLC-E40DRF com 24 entradas (24 VDC) e 14 saídas à relé (2A) e 02 saídas à transistor (1A) e expansões modelos TM2AMI4LT com 04 entradas analógicas de 12 bits (0-10V, 0-20mA, PT100, PT1000, NI100 e NI1000) e TM2AMM6HT com 04 entradas e 02 saídas analógicas de 12 bits (0-10V e 4-20mA) (Figura 4.7). O programa utilizado para a programação do CLP foi o Twido Suite versão 2.20.10, que possui ambiente de desenvolvimento gráfico com recursos para criar programas com diferentes tipos de linguagem e de configuração da CPU e módulos de expansão.

Figura 4.7 - Controlador lógico programável e expansões



Fonte: Moreira (2011).

Além disso, o controlador compacto TWDLCAE40DRF possui embutido uma porta de comunicações Ethernet RJ45, que permite realizar todas as comunicações em tempo real e tarefas de gestão do sistema através da rede. A Comunicação Ethernet implementa o protocolo Modbus TCP / IP.

4.5 Sistema SCADA

O LEA utiliza o supervisor Elipse SCADA devido ao alto desempenho e versatilidade disponíveis em seus diversos recursos que facilitam e agilizam a tarefa de desenvolvimento da aplicação. Outro fator importante para escolha do Elipse SCADA é que o programa é totalmente configurável pelo usuário, permitindo a monitoração de variáveis em tempo real, através de gráficos e objetos que estão relacionados com as variáveis físicas de campo, além da possibilidade de fazer acionamentos e enviar ou receber informações para equipamentos de aquisição de dados.

O LEA possui uma licença PRO, versão mais avançada do Elipse SCADA. Esta versão permite trocar dados em tempo real com outras estações, transferir ou atualizar bancos de dados, realizar comandos e programar *setpoints* através de rede local ou linha discada (ELIPSE, 2008).

A comunicação do sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e o controlador lógico programável (CLP) são realizados pelo protocolo de comunicação Modbus e rede física Ethernet. Foram utilizados os parâmetros estabelecidos de acordo com o manual do fabricante.

4.6 Protótipo desenvolvido do seguidor solar

A estrutura metálica do seguidor solar foi desenvolvida no Laboratório de Mecânica da Universidade Federal do Ceará - UFC. O seguidor possui uma armação fixa e uma plataforma móvel, onde foi fixado o painel FV. O seguidor solar desenvolvido é observado na Figura 4.8.

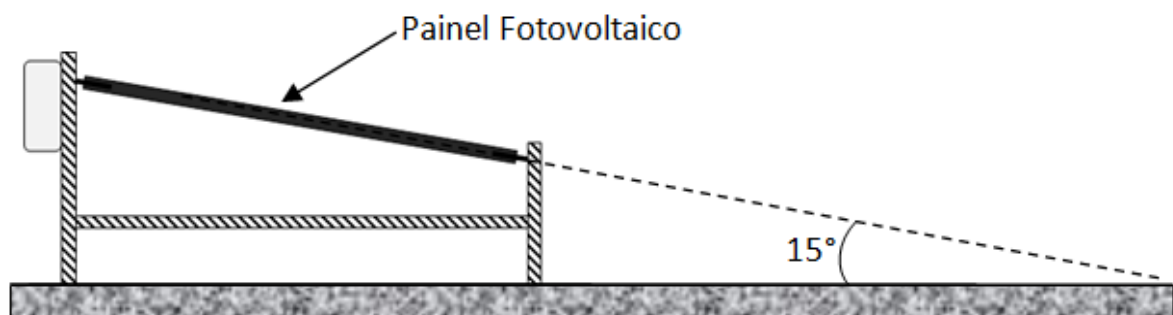
A plataforma, juntamente com o painel FV, possui inclinação de 15° em relação ao solo, conforme observado na Figura 4.9. A inclinação foi estabelecida a fim de diminuir o acúmulo de poeira e água das chuvas, fatores que reduzem a eficiência na geração de eletricidade.

Figura 4.8 - Seguidor solar desenvolvido no LEA .



Fonte: Autor.

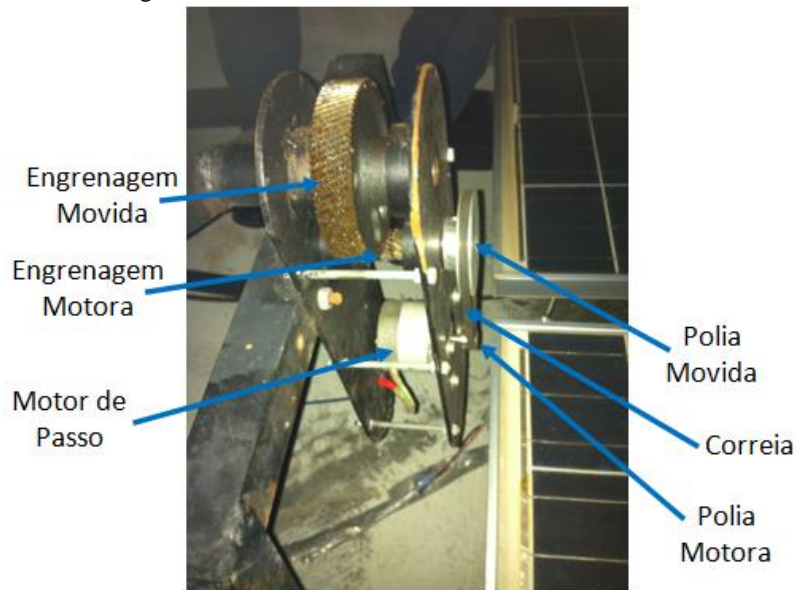
Figura 4.9 - Inclinação do painel FV.



Fonte: Autor.

O movimento de rotação da plataforma juntamente com o painel FV móvel é realizado pela transmissão entre a correia, polias e engrenagens que são acionados pelo motor de passo. O mecanismo de acionamento da plataforma de giro do seguidor pode ser observado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Mecanismo do seguidor solar

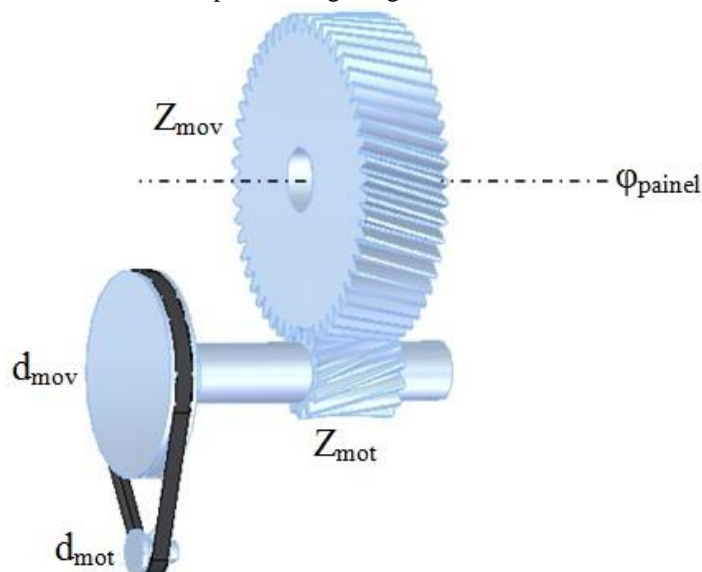


Fonte: Autor.

A transmissão utilizada permite a movimentação de carga superior à capacidade de torque estacionário do motor de passo (15 Kg.cm), isto porque é utilizado um sistema de redução, em que a polia motora possui o diâmetro inferior a polia movida. No mesmo eixo de rotação da polia movida encontra-se a engrenagem motora, que é acoplada a engrenagem movida responsável pela movimentação angular da plataforma.

A relação de transmissão do deslocamento angular entre a polia motora e a engrenagem movida (Figura 4.11) é dada pela Equação 4.1.

Figura 4.11 - Relação de transmissão entre polias e engrenagens



Fonte: Autor.

$$n^{\circ} \text{ pulsos} = \left(\frac{\frac{\varphi_{\text{painel}}}{360} \cdot d_{\text{mov}} \cdot Z_{\text{mov}}}{d_{\text{mot}} \cdot Z_{\text{mot}}} \right) \cdot 200 \quad (4.1)$$

Em que,

- n_{pulsos} - Número de pulsos por rotação do motor de passo
- φ_{painel} - Deslocamento angular do painel
- d_{mov} - Diâmetro da polia movida (mm)
- Z_{mov} - Número de dentes da engrenagem movida
- d_{mot} - Diâmetro da polia motora (mm)
- Z_{mot} - Número de dentes da engrenagem motora

Para movimentação da plataforma do seguidor solar foi utilizado o motor de passo do fabricante Nema 34, modelo 4034-326-T e a configuração adotada para energização das bobinas foi a unipolar. A escolha foi determinada por ser a configuração mais simples de controlar e que apresenta bom desempenho no funcionamento.

Embora o motor de passo tenha seis fios, dois desses fios são ligados internamente no centro de duas bobinas. Ao conectar o motor de passo nas saídas do CLP os fios que estão ligados ao centro das bobinas são interligados no mesmo terminal. Esses fios são conhecidos por “*center-tape*” e tem como função alimentar o motor, enquanto que os terminais quando aterrados, efetuam o controle do movimento. A ligação unipolar pode ser vista na Figura 4.12 e na Tabela 4.3 as características do motor de passo Nema 34, modelo 4034-326-T.

Figura 4.12 – Ligação Unipolar

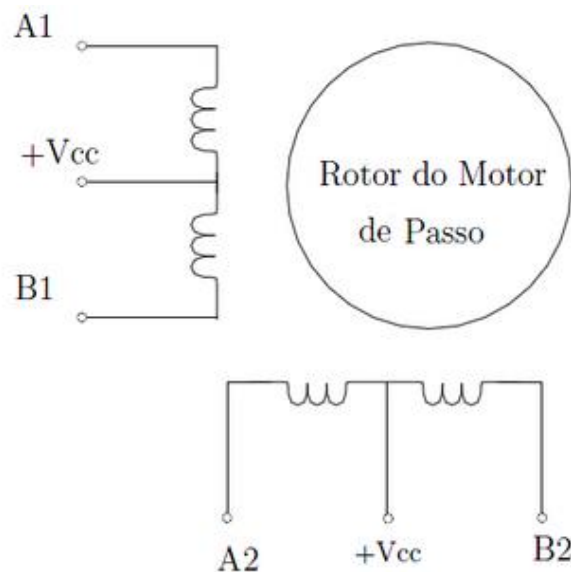


Tabela 4.3 – Características do motor de passo Nema 34 Modelo 4034-326-T

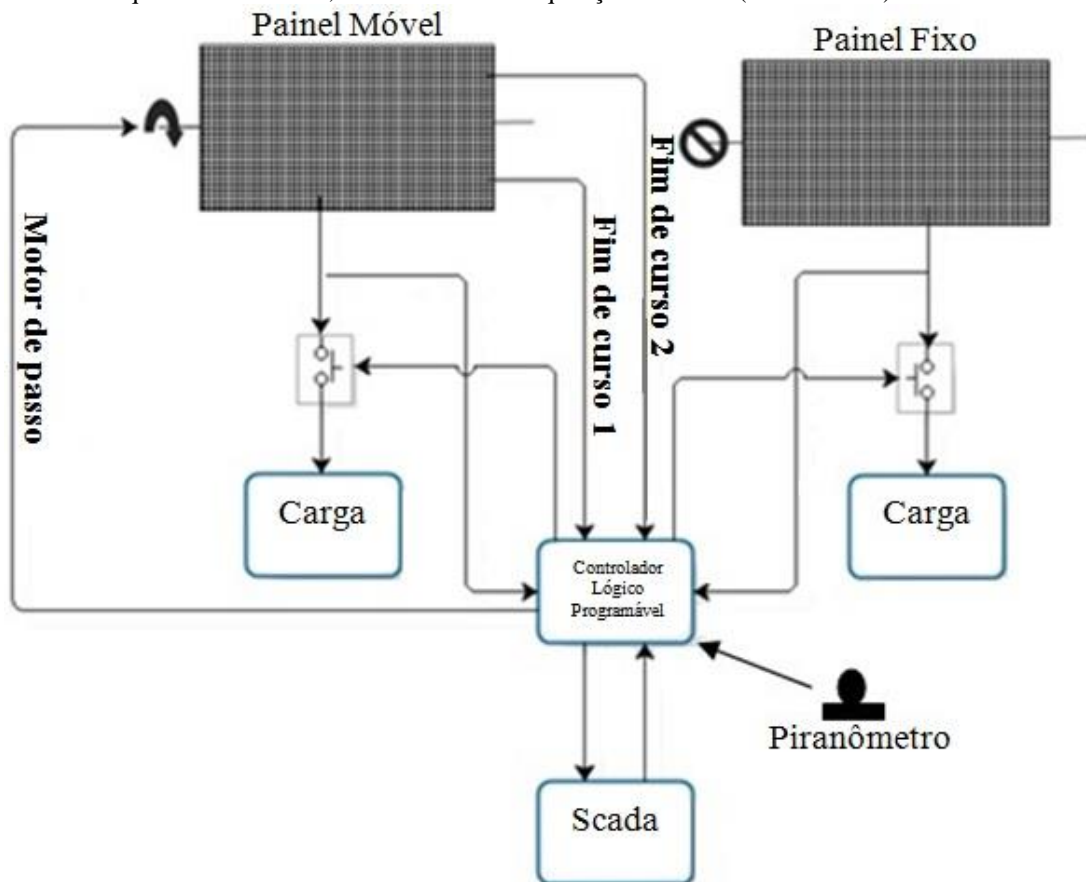
| Descrição | Dados |
|--------------------------------|-----------------------|
| Torque estático | 15 Kg.cm |
| Diâmetro do eixo | 3/8" |
| Corrente para ligação unipolar | 4,7 A |
| Inércia | 560 g.cm ² |
| Peso do Motor | 1,5 Kg |
| Quantidade de fios | 6 fios |
| Resolução | 200 PPR |
| Temperatura ambiente | -20 °C à +50 °C |
| Classe de isolamento | Até 130 °C |

Fonte: Gecko (2013)

4.7 Controle e aquisição de dados

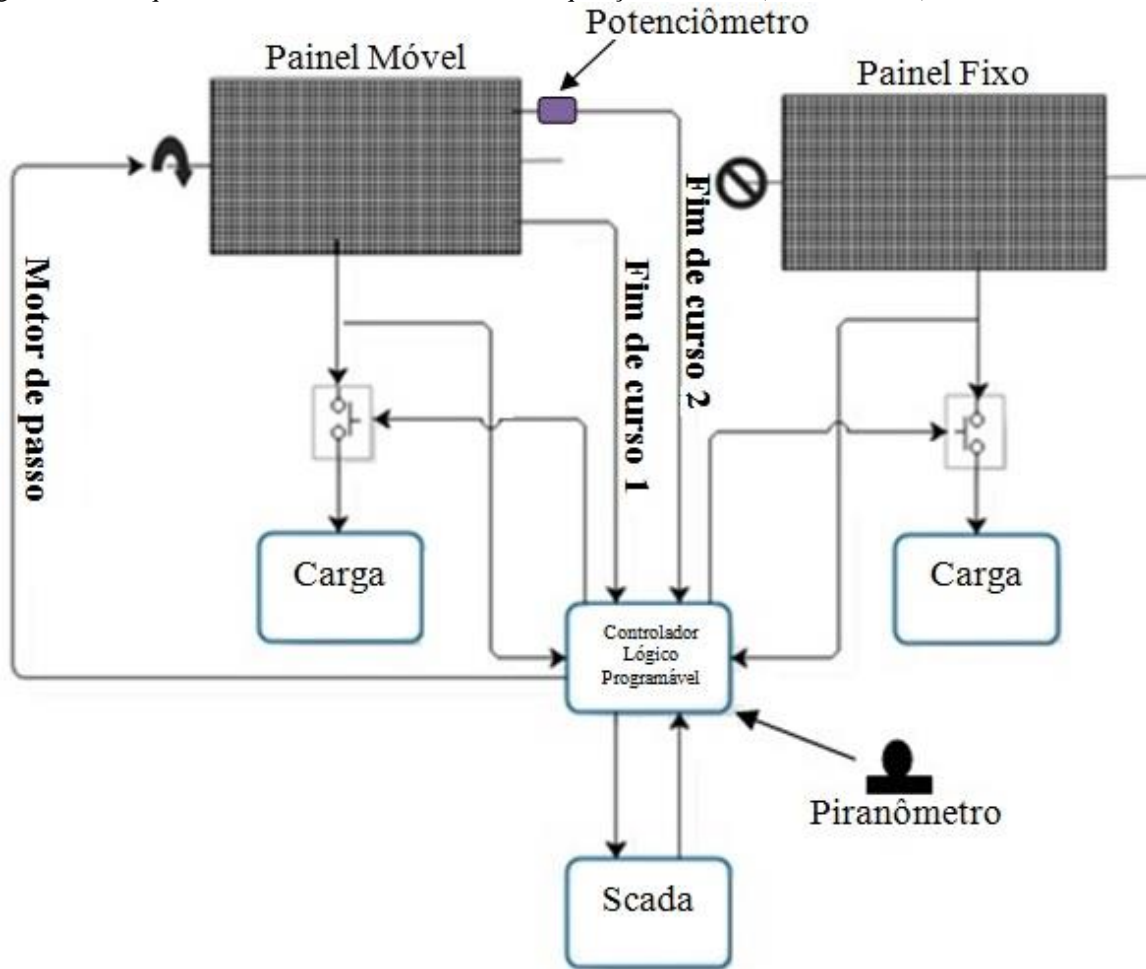
Para realizar o controle, monitoramento e aquisição de dados dos painéis FV os equipamentos foram conectados com as configurações em malha aberta e fechada, conforme a Figura 4.13 e Figura 4.14, respectivamente.

Figura 4.13 - Esquema de Controle, monitoramento e aquisição de dados (malha aberta).



Fonte: Autor.

Figura 4.14 - Esquema de Controle, monitoramento e aquisição de dados (malha fechada)



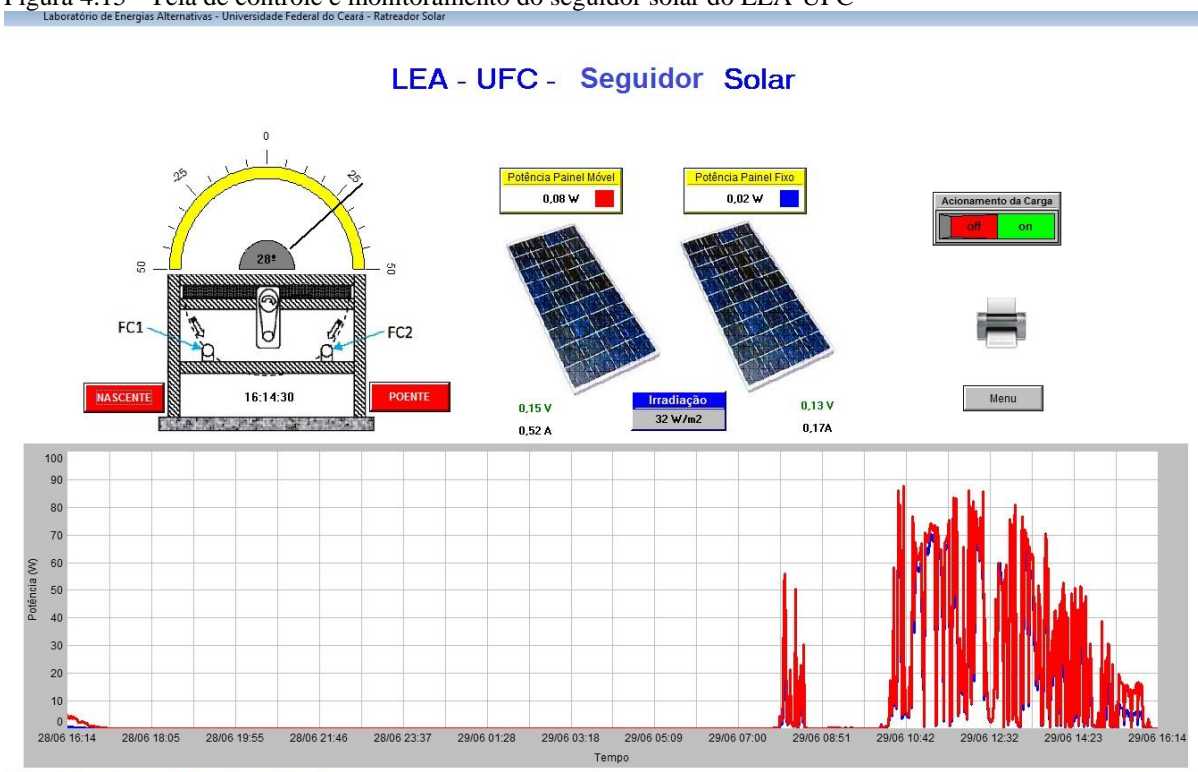
Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 4.13 e na Figura 4.14 o monitoramento, controle manual e aquisição de dados são realizados da mesma forma em ambas as configurações (malha aberta e fechada). O CLP recebe os sinais digitais do monitoramento do posicionamento nascente/poente através dos fins de cursos FC1 e FC2, o controle manual com o acionamento das cargas pelos relés ocorre através da transmissão de dados digitais entre o controlador lógico programável e o sistema SCADA. Da mesma forma, a aquisição de dados analógicos de corrente e tensão (potência dos painéis) e irradiância ocorrem simultaneamente do painel móvel e fixo para o CLP e posteriormente armazenados no sistema SCADA. No entanto considerando a forma de controle do sistema em malha fechada é acrescentado o sensor de realimentação da posição angular do painel móvel (potenciômetro). A função deste sensor é enviar o sinal analógico da posição angular atual (variável do processo) para o CLP, onde será comparado com a posição angular estabelecida (*set-point*) pelo programa do usuário. Existindo diferença entre as posições atual e a estabelecida o CLP enviará um sinal

digital para o acionamento do motor de passo a fim de corrigir o posicionamento angular do seguidor.

Na Figura 4.15 é observada a tela de controle e monitoramento do seguidor solar do LEA-UFC.

Figura 4.15 - Tela de controle e monitoramento do seguidor solar do LEA-UFC



Fonte: Autor.

Dentre as funcionalidades da tela de controle e monitoramento do seguidor solar proposto pode-se destacar o controle manual da posição do painel para a posição nascente ou poente, acionamento manual das cargas, verificação dos valores instantâneos de irradiância, tensão, corrente e potência dos painéis móvel e fixo, acompanhamento com gráfico do comportamento diário das potências acumuladas do painel fixo e móvel, além de permitir a impressão do relatório dos registros dos dados.

O LEA dispõe de banco de controladores de carga e baterias; entretanto, verificou-se que para realizar os experimentos os painéis FV poderiam ser conectados diretamente nas cargas (lâmpadas de 55 W). A escolha dessa configuração é devido à simplicidade e também pelo fato de que os ensaios seriam realizados apenas nos períodos em que há luminosidade e irradiação solar.

O sistema adotado centraliza toda lógica de controle e aquisição de dados no controlador lógico programável. A aplicação SCADA tem a função de controle, monitoramento e armazenamento dos dados enviados pelo CLP.

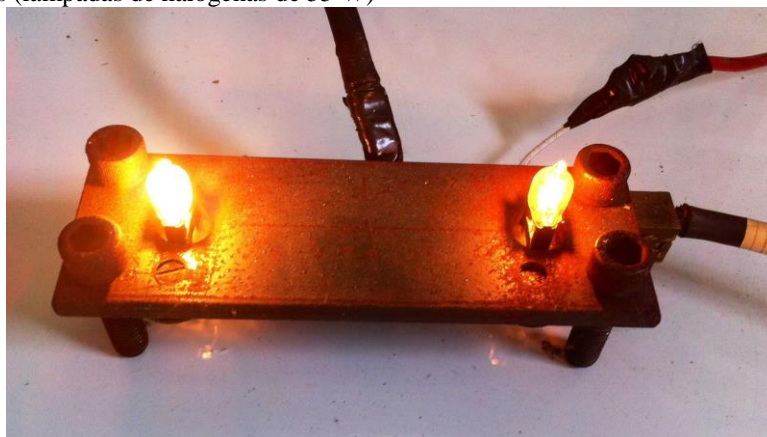
A fim de aperfeiçoar o número de registros coletados pelo banco de dados do sistema supervisorio, foi inserido no algoritmo de controle do seguidor solar, através do *real time clock* (RTC) do CLP, a condição de funcionamento de 6h às 18h e um minuto. Essa condição evita que no período noturno, em que a irradiação solar é nula, o seguidor solar entre em operação.

4.8 Metodologia do funcionamento do seguidor solar

Foram adotadas as configurações de acionamento em malha aberta e malha fechada e para cada configuração testados três intervalos de tempo da atualização da posição angular do seguidor solar proposto, sendo o reposicionamento do painel efetuado a cada 15, 30 e 60 minutos. Baseado no projeto de Huang, Ding e Huang (2011), também foi implementado o reposicionamento do painel em três posições na configuração em malha fechada. Foi estabelecido ainda de forma empírica, o intervalo de funcionamento de 6h às 18h, a faixa de atuação do seguidor solar em 100 graus, além do acionamento das cargas de 55 W (Figura 4.16), sendo uma carga para cada painel (fixo e móvel).

A fim de facilitar a mudança dos tempos de aquisição, o controle e monitoramento do funcionamento do seguidor solar, foi adicionado o acesso remoto ao sistema de supervisão do LEA.

Figura 4.16 - Cargas (lâmpadas de halógenas de 55 W)



Fonte: Autor.

Os valores de posicionamento foram estabelecidos conforme a divisão do deslocamento angular total do seguidor solar (100°) em 12 horas. Os valores de posicionamento são utilizados para determinar os incrementos angulares desejados: para 60 minutos, 30 minutos e 15 minutos, obtém-se $8,33^\circ$, $4,16^\circ$ e $2,08^\circ$, respectivamente e para 3 posições $33,33^\circ$.

Em ambas as configurações (malha aberta e malha fechada), o acionamento do motor de passo se dá de acordo com os parâmetros de funcionamento do seguidor solar observados na Tabela 4.4 no período de 12h e deslocamento angular total de 100 graus. Foram analisados dados dos meses Abril, Maio, Junho e Julho de 2015.

Foi estabelecido, para permitir a análise nas mesmas condições meteorológicas, o agrupamento dos dados quinzenalmente, ou seja, nos primeiros quinze dias de Abril, Maio e Junho o dispositivo funcionou em malha aberta e os demais dias em malha fechada e Julho somente em malha fechada. A escolha do dia típico a ser analisado no intervalo de quinze dias foi baseada nas médias dos valores das irradiações obtidas no período.

Finalmente para realizar o balanço de energia do seguidor solar, os valores de geração elétrica do painel são comparados com o total de energia utilizada nos dispositivos de controle e acionamento do seguidor solar.

Tabela 4.4 - Parâmetros de funcionamento do seguidor solar

| Tempo (min) | Acionamento (nº de vezes em 12h) | Incremento angular (graus) |
|-------------|----------------------------------|----------------------------|
| 15 | 48 | 2,08 |
| 30 | 24 | 4,16 |
| 60 | 12 | 8,33 |
| 180 | 3 | 33,33 |

Fonte: Autor.

4.8.1 Funcionamento em malha aberta

Para a conversão em malha aberta foi estabelecido o movimento de rotação do seguidor solar (Figura 4.17) baseado no tempo e contagem de pulsos para o acionamento da carga de 55 W. O funcionamento do seguidor solar se inicia quando o RTC do CLP registra 6h e o fim de curso FC1 esteja acionado.

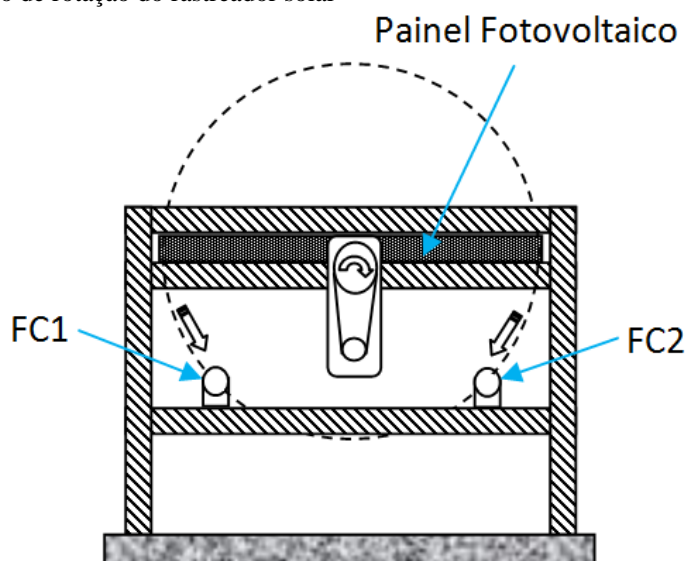
Após o início do funcionamento do seguidor solar, a contagem do tempo ocorre automaticamente durante o total de 12h (6 às 18h) e assim, a cada intervalo de tempo preestabelecido de 15, 30 e 60 minutos, o CLP envia um sinal, através de contadores de

pulsos, para o motor de passo incrementar o número de passos conforme a relação descrita na Equação 4.1.

Ao acionar o fim de curso FC2 ou o RTC registrar 18 horas e 1 minuto, o CLP envia um comando para que o seguidor solar retorne para posição inicial acionando o fim de curso FC1, aguardando um novo registro do RTC em 6h para iniciar um novo ciclo de rastreamento.

O funcionamento correto do sistema em malha aberta sem a utilização do banco de baterias depende da ininterruptão do fornecimento de energia elétrica no LEA. Portanto, em caso de falta de energia elétrica da rede a contagem dos pulsos é interrompida e o sistema de acionamento do seguidor solar apresentará defasagem angular. Ou seja, o painel terá um ângulo de posicionamento angular inferior ao do horário em que foi restabelecida a energia elétrica do LEA, sendo necessário efetuar a correção da posição do painel móvel manualmente.

Figura 4.17 - Movimento de rotação do rastreador solar



Fonte: Autor.

4.8.2 Funcionamento em malha fechada

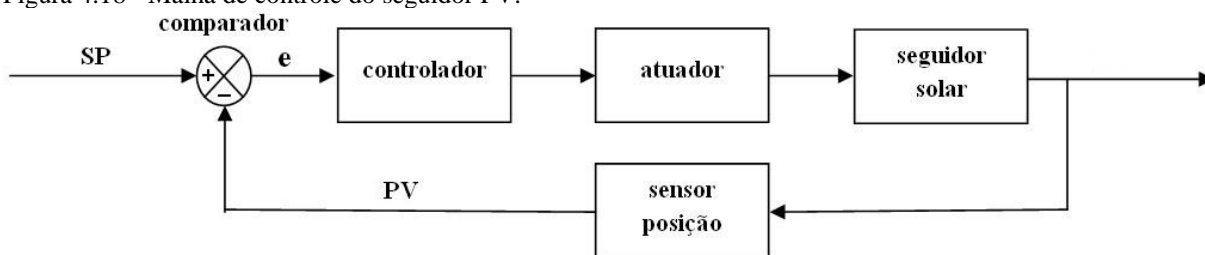
O funcionamento da configuração em malha fechada (Figura 4.14) é baseado em comparação de dados preestabelecidos referentes ao número de posicionamentos desejados do seguidor solar (*set-point* - *SP*), que correspondem aos valores dos incrementos estabelecidos (15, 30, 60 e 180 minutos) e sinal gerado pela posição atual do rastreador solar (variável do processo - *PV*).

Para gerar o sinal da posição atual, foi utilizado, como sensor de posição, um potenciômetro linear de 100 Ω alimentado por uma fonte de 5 V. Ao rotacionar o eixo do potenciômetro, a resistência dos terminais de saída é alterada e conseqüentemente o sinal de tensão aplicado à entrada analógica do CLP é modificado.

Foi determinada a faixa de funcionamento do sensor de posição angular entre as posições FC1 e FC2, de acordo com a Figura 4.17. Tais valores de tensão são convertidos em variável binário/decimal para que seja estabelecida a comparação de dados com o valor preestabelecido e dessa forma, a identificação atual da posição angular do seguidor solar. Na Figura 4.18 é ilustrada a malha de controle do seguidor solar, em que o valor da variável do processo (PV) ou posição angular atual é identificada pelo sensor de posição e posteriormente comparada com o valor de referência de posicionamento angular (SP), que corresponde ao valor preestabelecido para o horário de acordo com os intervalos a cada 15, 30, 60 e 180 minutos. A diferença entre PV e SP resulta num erro de posicionamento angular (e). O erro gerado pode ser positivo ou negativo fazendo com que o seguidor solar seja reposicionado em direção ao poente ou nascente.

Para realizar a comparação entre a posição atual (PV) e a posição desejada (SP) para o horário, foi estabelecida uma tabela contendo os valores relacionados ao horário, posição angular e sinal do sensor referente ao posicionamento do seguidor solar.

Figura 4.18 - Malha de controle do seguidor FV.



Fonte: Autor.

Conforme mencionado anteriormente, o motor de passo utilizado no protótipo do seguidor solar possui 200 pulsos por rotação, que é equivalente ao incremento angular de 1,8°. Dessa forma, foram utilizados apenas os valores inteiros obtidos nos incrementos angulares para os posicionamentos de 15, 30, 60 e 180 minutos. Na Tabela 4.5 são observados os horários e valores estabelecidos para o deslocamento angular do seguidor solar.

Tabela 4.5 - Horários e valores estabelecidos para o deslocamento angular do seguidor solar.

| Hora | Hexadecimal | Decimal | Posição (decimal) | Posição (angular) (graus) |
|-------|-------------|---------|-------------------|---------------------------|
| 6:00 | 600 | 1536 | 244 | -50 |
| 6:15 | 615 | 1557 | 241 | -47 |
| 6:30 | 630 | 1584 | 239 | -45 |
| 6:45 | 645 | 1605 | 237 | -43 |
| 7:00 | 700 | 1792 | 235 | -41 |
| 7:15 | 715 | 1813 | 233 | -39 |
| 7:30 | 730 | 1840 | 231 | -37 |
| 7:45 | 745 | 1861 | 229 | -35 |
| 8:00 | 800 | 2048 | 227 | -33 |
| 8:15 | 815 | 2069 | 225 | -31 |
| 8:30 | 830 | 2096 | 223 | -29 |
| 8:45 | 845 | 2117 | 221 | -27 |
| 9:00 | 900 | 2304 | 219 | -25 |
| 9:15 | 915 | 2325 | 217 | -22 |
| 9:30 | 930 | 2352 | 215 | -20 |
| 9:45 | 945 | 2373 | 213 | -18 |
| 10:00 | 1000 | 4096 | 211 | -16 |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| 14:00 | 1400 | 5120 | 178 | 16 |
| 14:15 | 1415 | 5141 | 176 | 18 |
| 14:30 | 1430 | 5168 | 174 | 20 |
| 14:45 | 1445 | 5189 | 172 | 22 |
| 15:00 | 1500 | 5376 | 170 | 25 |
| 15:15 | 1515 | 5397 | 168 | 27 |
| 15:30 | 1530 | 5424 | 166 | 29 |
| 15:45 | 1545 | 5445 | 164 | 31 |
| 16:00 | 1600 | 5632 | 162 | 33 |
| 16:15 | 1615 | 5653 | 160 | 35 |
| 16:30 | 1630 | 5680 | 158 | 37 |
| 16:45 | 1645 | 5701 | 156 | 39 |
| 17:00 | 1700 | 5888 | 154 | 41 |
| 17:15 | 1715 | 5909 | 152 | 43 |
| 17:30 | 1730 | 5936 | 150 | 45 |
| 17:45 | 1745 | 5957 | 148 | 47 |
| 18:00 | 1800 | 6144 | 146 | 50 |

Fonte: Autor.

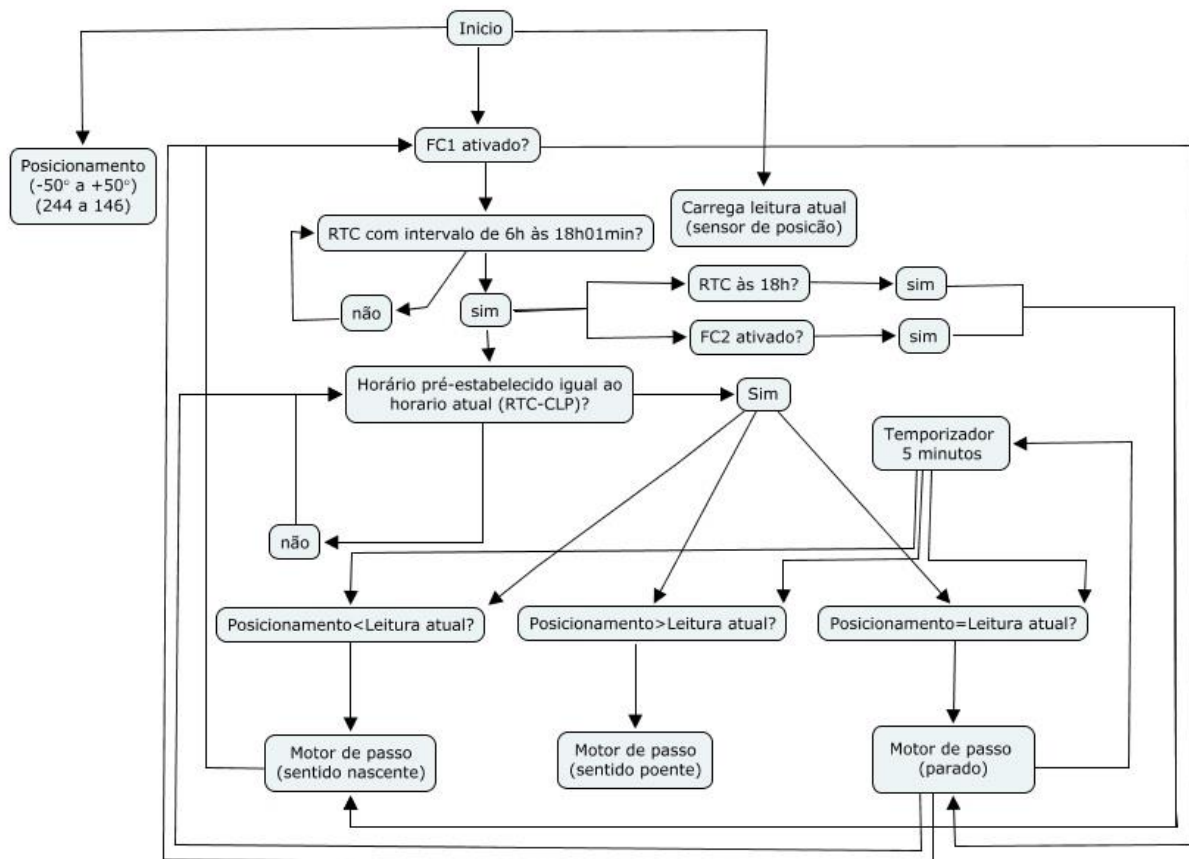
O CLP e os diversos sistemas do seguidor solar têm vários formatos de dados (hexadecimal, binário e decimal). Para facilitar a comparação as variáveis foram convertidas para o mesmo formato, o decimal.

Foi estabelecida uma tabela de valores de *set-point* do posicionamento do seguidor solar, que quando comparado com o valor atual registrado no sensor de posição (leitura atual), induz três possibilidades distintas no programa implementado no CLP: posicionamento menor que leitura atual, posicionamento maior que leitura atual, ou posicionamento igual à leitura atual. Após o horário preestabelecido ser igual ao horário informado pelo RTC (hexadecimal convertido em decimal), o motor de passo é ativado no sentido horário ou anti-horário até que a condição de posicionamento seja igual à leitura atual.

Devido à movimentação ocasionada por fatores climáticos como, por exemplo, vento e também da inércia do movimento do seguidor solar, foi estabelecida na programação a correção do posicionamento do painel a cada 5 minutos. A correção do posicionamento é efetuada utilizando novamente as três possibilidades mencionadas anteriormente.

Após o painel solar executar os incrementos angulares previstos, o seguidor solar retorna a posição inicial (nascente) permitindo assim, iniciar um novo ciclo. O retorno ocorre quando o fim de curso FC2 for ativado ou o RTC registrar 18 horas. Na Figura 4.19 é observado o mapa conceitual do funcionamento do seguidor solar em malha fechada.

Figura 4.19 - mapa conceitual do funcionamento do seguidor solar (malha fechada).



Ao colocar o CLP no modo “RUN”, o ciclo de varredura do programa implementado é iniciado e assim, carregando os posicionamentos angulares preestabelecidos, que estão relacionados aos números de posicionamentos desejados para os intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos (*set-points*). Da mesma forma, o valor da posição angular atual do painel (variável do processo) é enviado, através do sensor de posição, para entrada analógica do CLP.

Comitadamente, o ciclo de varredura do CLP verifica se o fim de curso FC1, posição nascente, está ativado. Após a ativação do sensor FC1 o CLP executa uma rotina de verificação e condição de funcionamento do seguidor solar. O rastreador funcionará apenas quando o *Real time Clock* (RTC), temporizador interno do CLP, estiver indicando o intervalo de 6h às 18h e 1 minuto.

O intervalo de funcionamento foi estabelecido baseado no início e fim da emissão de irradiação solar (6h e 18h). O minuto adicional é o tempo necessário que permite o seguidor solar, ao atingir o FC2 ou o RTC indicar 18h, retornar a posição inicial de funcionamento (posição nascente).

Assim, estando o RTC no intervalo estabelecido (6h às 18h01min), inicia-se a comparação dos dados entre o horário preestabelecido e horário atual do RTC. Sendo verdadeira a condição, ocorre a comparação entre os dados de *set-point* (posicionamento) e posição angular atual (leitura atual).

Se a variável que corresponde ao posicionamento angular for menor que a variável da posição atual, o motor de passo é ativado e o seguidor solar movimenta-se no sentido nascente. Caso a variável que corresponde ao posicionamento angular seja maior que a variável da posição atual do seguidor, o seguidor solar movimenta-se no sentido poente. A movimentação ocorre até que as variáveis sejam iguais, quando o motor de passo é desativado.

Após a condição de igualdade entre o posicionamento angular preestabelecido e posição angular atual, em que o motor de passo encontra-se desativado, um temporizador com tempo estabelecido de 5 minutos é ativado e uma nova comparação entre os posicionamentos angulares é iniciada. A comparação faz-se necessário, pois devido à inércia do movimento do seguidor solar e os ventos provocam desvios de posição, ocasionando erros de posicionamento angular.

Ainda, após o motor estar na condição “parado” e o RTC indicando o intervalo estabelecido (6h às 18h01min), ocorre novamente a comparação dos dados entre o horário

preestabelecido e horário atual do RTC e portanto ocorrendo mais uma vez a comparação entre os dados de *set-point* (posicionamento) e posição angular atual (leitura atual).

As movimentações do seguidor solar vão ocorrendo até que o RTC indique 18h ou que o fim de curso FC2 (poente) seja ativado. Satisfazendo uma dessas condições, o motor de passo é acionado no sentido nascente até que novamente o fim de curso FC1 seja ativado e dessa forma, iniciando um novo ciclo de rastreamento solar.

4.9 Análise Financeira

Para analisar a viabilidade financeira, foram calculados os valores líquidos presente (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o *payback* descontado ou prazo de retorno do projeto.

O VPL pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado, em que o projeto que apresenta o VPL maior que zero (positivo) é considerado economicamente viável, sendo considerado o melhor aquele que apresentar maior VPL. Em outras palavras, o VPL é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos (SILVA e FONTES, 2005). Conforme Ross (2002) o VPL pode ser determinado pela Equação 4.2.

$$\text{VPL} = \frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} - CF_0 \quad (4.2)$$

Em que,

- FC_n - Fluxo de caixa de ordem n
- i - Taxa de desconto
- nn - Período (ano)
- CF₀ - Investimento inicial

A taxa interna de retorno (TIR), que representa a taxa de desconto que iguala, em determinado as entradas com as saídas previstas de caixa. Com base na regra da TIR, um investimento é aceito se a TIR for maior do que a taxa mínima de atratividade (TMA). Caso contrário, deve ser rejeitado (ASSAF NETO, 2003). As vantagens na utilização da TIR, por estar intimamente relacionada com o VPL (valor presente líquido), geralmente conduz à mesma decisão. Conforme Ross (2002) a TIR pode ser calculada pela Equação 4.3.

$$0 = -CF_0 + \frac{FC_1}{(1+TIR)} + \frac{FC_2}{(1+TIR)^2} + \frac{FC_3}{(1+TIR)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} \quad (4.3)$$

Em que,

- FC_n - Fluxo de caixa de ordem n
 n - Período (ano)
 CF_0 - Investimento inicial

O *payback* descontado mostra o tempo necessário para que os benefícios do projeto restitua o valor investido. Em outras palavras, expressa o período de tempo necessário para que as entradas de caixa se igualem ao que foi inicialmente investido, podendo ser considerado uma medida de risco do projeto (RASOTO ET AL. , 2012).

4.10 Considerações finais

Considerando os aspectos eletromecânicos do seguidor solar, durante o período de funcionamento (cinco meses) a estrutura não apresentou nenhum tipo de intervenção e/ou manutenção; porém, o potenciômetro, que faz a função de sensor de realimentação da posição angular, necessitou de intervenções não planejadas como ajustes e substituição. O sistema de transmissão composto por polias, correia e engrenagens responsáveis pela movimentação da plataforma onde é fixado o módulo FV se mostrou instável devido às folgas do sistema. Embora as folgas do sistema de transmissão tenham ocasionado pequenos desvios angulares no painel provocados por ventos ou inércias do movimento, estas não interferiram diretamente na geração de eletricidade; porém, se tratando da energia elétrica consumida e energia elétrica líquida, as folgas do sistema incidiram no maior número de funcionamento para correção da posição angular no sistema de malha fechada. Assim, devido à imprevisibilidade dos erros de posicionamento angular, foi analisado o pior cenário com a correção da posição angular a cada cinco minutos.

5 ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA

O presente capítulo apresenta a análise energética e financeira dos dados coletados dos painéis fotovoltaicos (FV) fixo e móveis do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará durante os meses de Março a Julho de 2015.

A partir dos dados de irradiação, tensão e corrente aplicadas na carga foi comparada a potência/energia consumida e gerada dos sistemas utilizando o painel fixo, móvel em malha aberta e móvel em malha fechada. Objetivando determinar o ganho de energia, foram analisados os sistemas em malha aberta e fechada com atualização da posição angular em 15, 30 e 60 minutos e sistema em malha fechada para 180 minutos do dia típico de cada mês (Tabela 5.1). Para a escolha do dia típico do mês foi utilizado o dia que mais se aproximou da média das irradiações dos meses de Abril, Maio, Junho e Julho.

Tabela 5.1 - Sistemas e dias típicos

| Dia Típico | Sistema |
|------------|---------------|
| 31/03/2015 | Malha fechada |
| 07/04/2015 | Malha aberta |
| 18/04/2015 | Malha fechada |
| 10/05/2015 | Malha aberta |
| 28/05/2015 | Malha fechada |
| 15/06/2015 | Malha aberta |
| 16/06/2015 | Malha fechada |
| 09/07/2015 | Malha fechada |

Fonte: Autor.

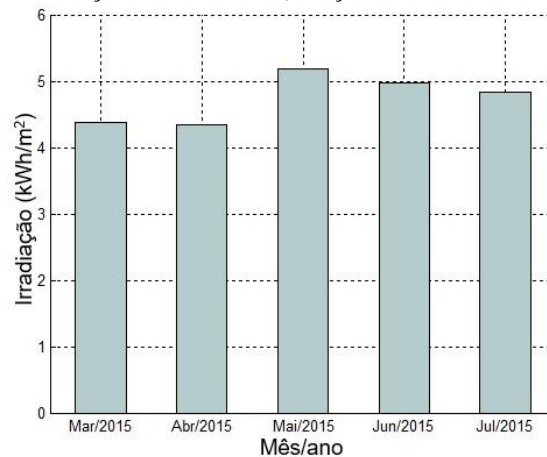
Com base nos ganhos de energia dos sistemas estudados, foi realizada a análise financeira utilizando a taxa de juros e as tarifas das bandeiras (verde, amarela e vermelha) aplicadas pela Companhia Energética do Ceará (COELCE).

5.1 Irradiação

Os dados de irradiação do LEA foram coletados durante os meses de Março a Julho de 2015 com o intervalo de 1 minuto no período de 6 às 18 horas; os dados foram agrupados por média diária e posteriormente calculada a média mensal.

Na Figura 5.1 são observadas as médias mensais de irradiação da estação de coleta do LEA-UFC.

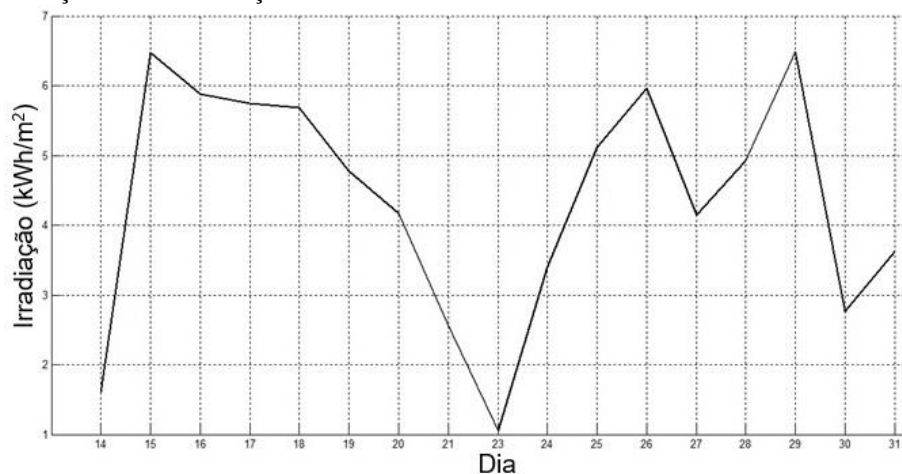
Figura 5.1 - Médias mensais de irradiação em Fortaleza (Março/2015 a Julho/2015)



Fonte: Autor.

Devido às características climáticas e geográficas, a região de Fortaleza tem duas estações climáticas bem definidas, sendo o segundo semestre seco, enquanto o primeiro é chuvoso. No mês de Março, por tratar-se do período da quadra chuvosa em Fortaleza e importante cenário para avaliar o potencial do seguidor solar, foi realizada na segunda quinzena do mês a análise dos dados seguindo o critério de sistema em malha fechada e atualização da posição angular em 15 minutos. Na Figura 5.2 são exibidos os valores de irradiação diária na segunda quinzena do mês de Março. Observa-se que nos dias 14 e 23 os valores de irradiação foram baixos, indicando dias completamente nublados, portanto não apresentando dados de potência suficientes para a análise de ganho de energia entre o painel móvel e fixo. Embora o dia 30 tenha apresentado condição nublada com bons níveis de irradiação, optou-se por analisar o dia 31 por apresentar condição nublada e valor de irradiação próximo a média do mês.

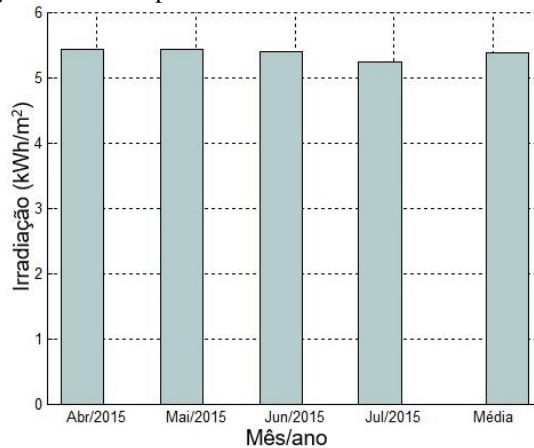
Figura 5.2 - Irradiação diária em Março/2015



Fonte: Autor.

Embora a média geral de irradiação calculada para os meses de Abril, Maio, Junho e Julho tenha sido de 4,98 kWh, foram identificados os dias com valores de irradiações próximos entre os meses e à média geral mensal calculada. Na Figura 5.3 são observadas as médias das irradiações medidas dos dias típicos de cada mês com o seguidor solar funcionando em malha aberta e fechada.

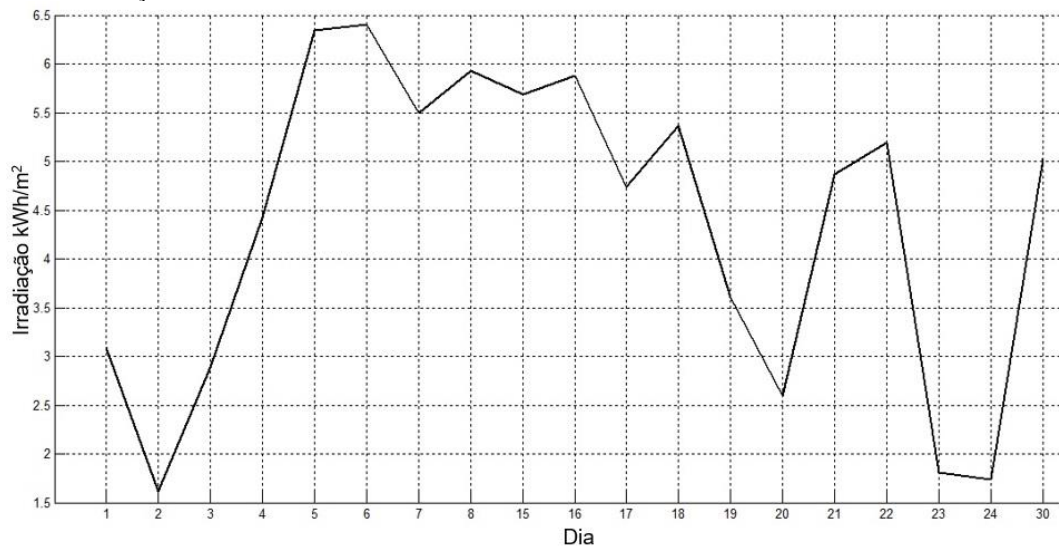
Figura 5.3 - Média das irradiações dos dias típicos em malha aberta e fechada - LEA



Fonte: Autor.

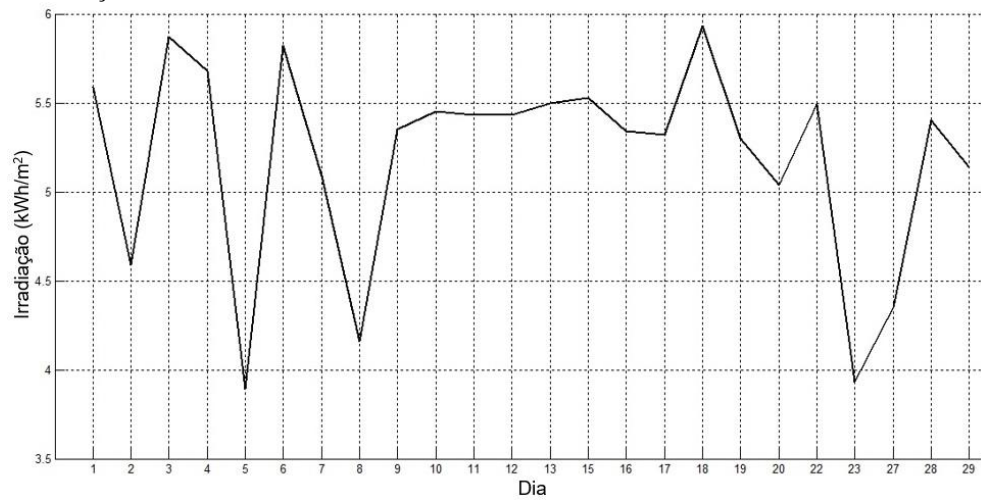
Na Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7 são observadas os valores coletados de irradiação diária no LEA nos meses de Abril, Maio, Junho e Julho respectivamente. Nas Figuras observa-se que os dias típicos mencionados na Tabela 5.1 apresentam valores de irradiação próximos a média dos meses de Abril, Maio, Junho e Julho (aproximadamente 5,37 kWh/m²).

Figura 5.4 - Irradiação diária em Abril/2015



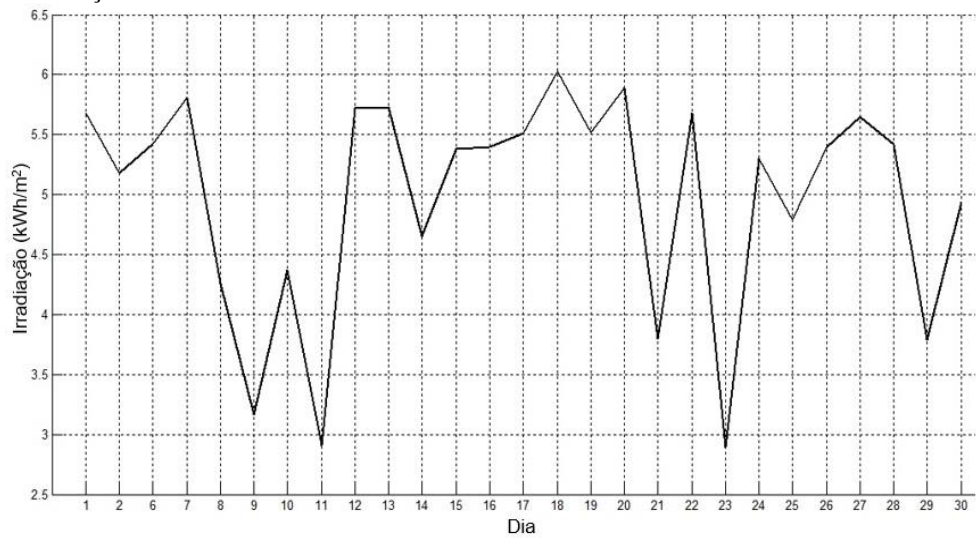
Fonte: Autor.

Figura 5.5 - Irradiação diária em Maio/2015



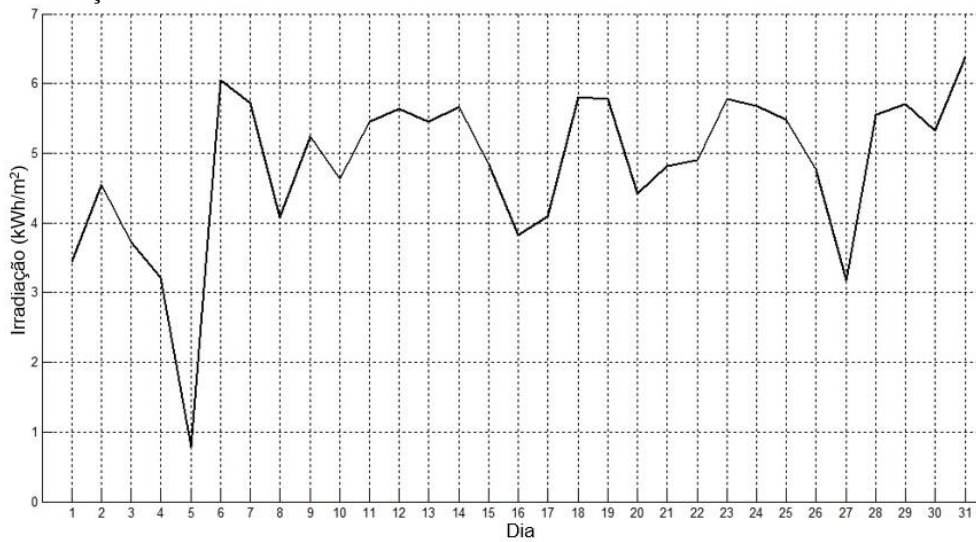
Fonte: Autor.

Figura 5.6 - Irradiação diária em Junho/2015



Fonte: Autor.

Figura 5.7 - Irradiação diária em Julho/2015



Fonte: Autor.

Objetivando submeter à análise dos dados coletados em condições semelhantes em malha aberta e fechada com atualização da posição angular em 15, 30, 60 e 180 minutos, foi calculada a média mensal dos meses de Abril, Maio, Junho e Julho para determinar a irradiação aproximada do dia típico.

Considerando os meses de Abril, Maio, Junho e Julho, observa-se que as médias gerais de irradiações dos dias típicos em malhas aberta e fechada, são aproximadamente 5.37 kWh/m², valor 7,8% acima da média geral dos meses e diferenças de 1,11%, 1,11%, 0,37% e 2,48% entre os valores de irradiação dos dias típicos dos meses de Abril, Maio, Junho e Julho, respectivamente. Assim, pode-se afirmar que a análise das potências em malha aberta e fechada com atualização do posicionamento angular em 15, 30 e 60 minutos e malha fechada para 180 minutos estão em condições climáticas semelhantes.

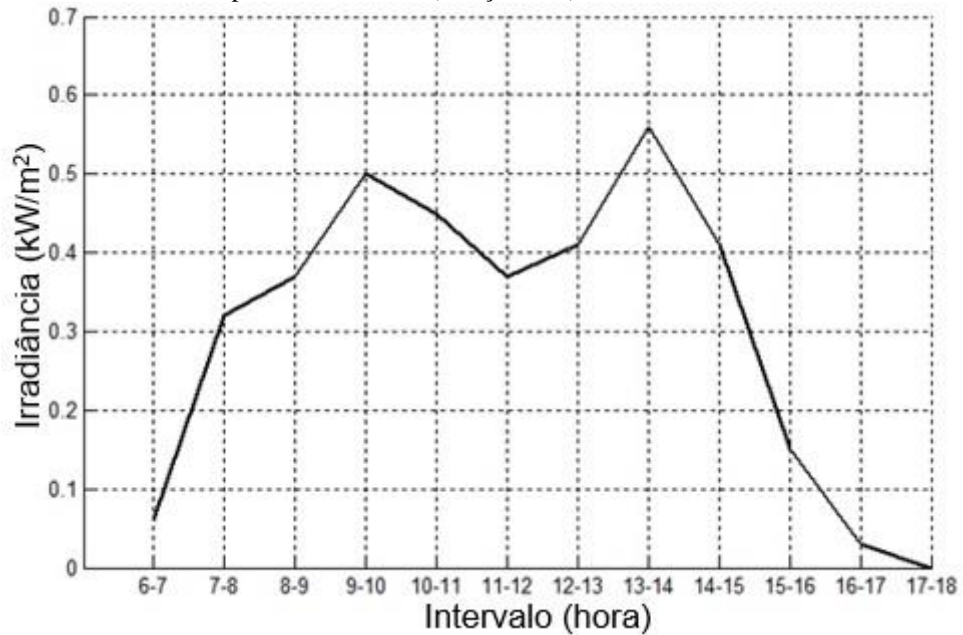
5.2 Potências fornecidas pelos painéis fotovoltaicos

Para determinar a energia total fornecida no dia, foi realizada a integração numérica dos dados através do método trapezoidal, utilizando a função “trapz” descrita em Palm (2013), que efetua integração discreta utilizando os pontos de dados para criar trapézios. Trata-se de método que é adequado para a manipulação de conjuntos de dados com descontinuidades. Este método assume comportamento linear entre os pontos de dados, e a precisão pode ser reduzida quando o comportamento entre pontos de dados é não linear. Assim, a fim de permitir a análise com a integração discreta semelhante dos dados coletados nos intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos, foram coletados dados de tensão e corrente a cada 60 segundos e agrupados a cada 30 minutos para calcular a potência fornecida pelos painéis FV com plataforma fixa e móvel.

Na Figura 5.8 é observado o gráfico de irradiância do dia parcialmente nublado em malha fechada (3,63 kWh/m²).

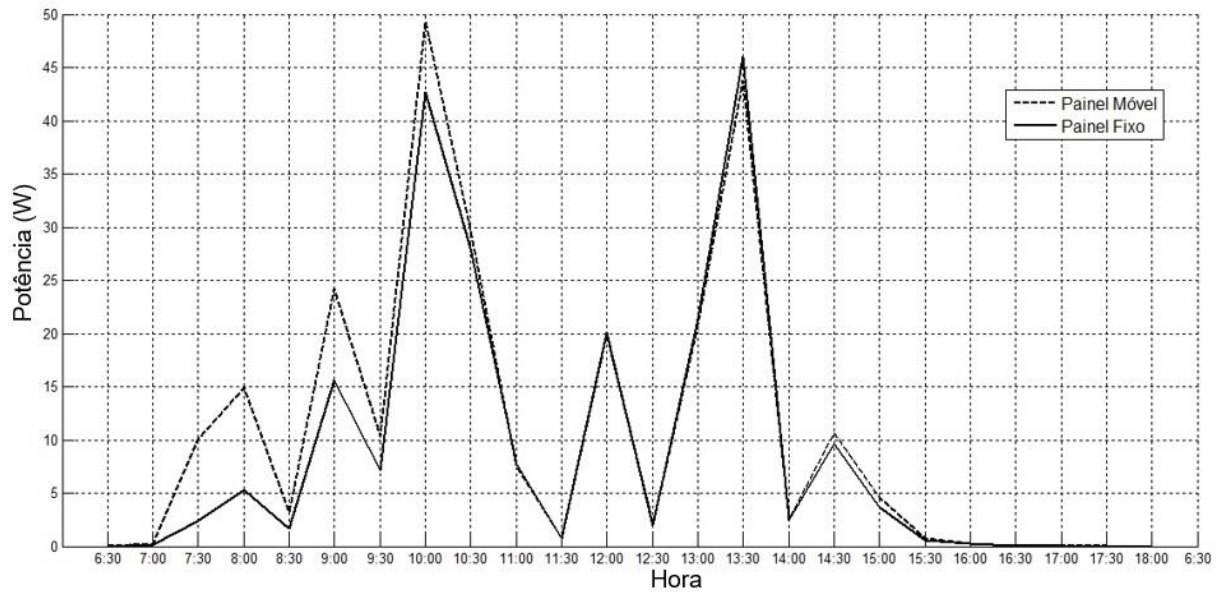
Na Figura 5.9 é observado o gráfico da potência fornecida em Março do painel móvel e fixo com atualização da posição angular em 15 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Março foram 255,93 Wh/dia e 217,45 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 17,69%.

Figura 5.8 - Irradiância de um dia típico – 15 minutos (Março/2015)



Fonte: Autor.

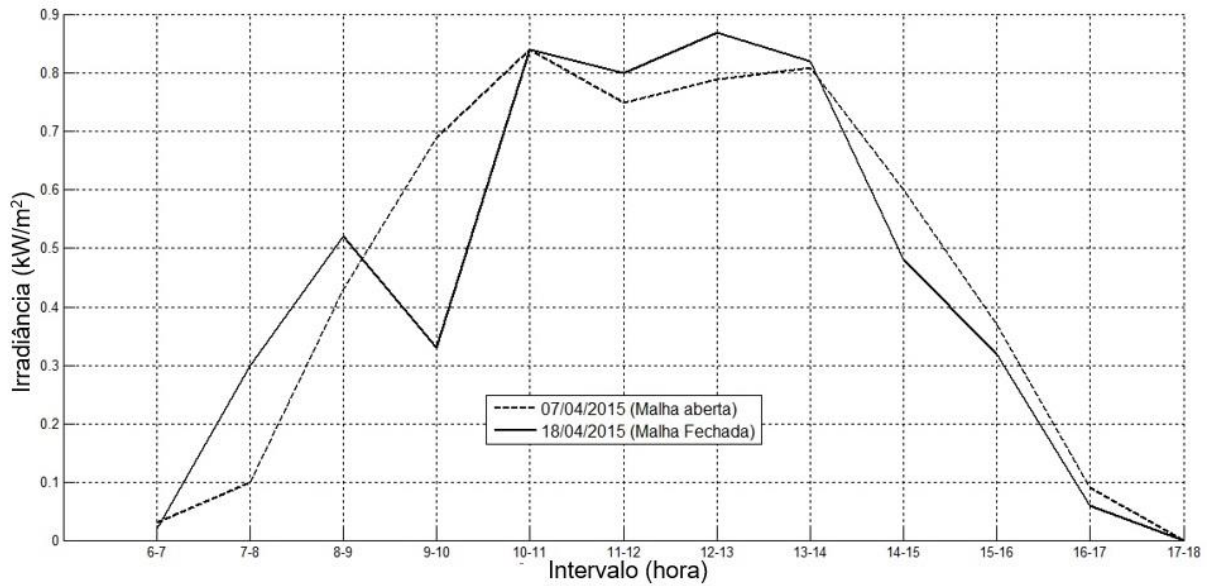
Figura. 5.9 - Potência em malha fechada -15 minutos (Março/2015)



Fonte: Autor.

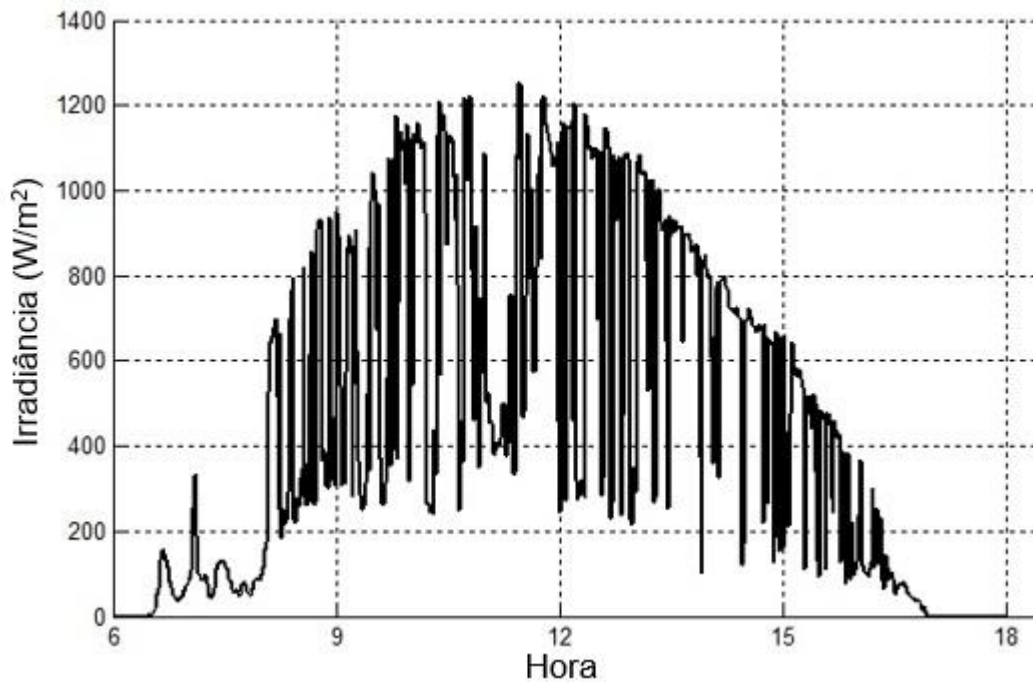
Na Figura 5.10 é observado o gráfico de irradiância dos dias típicos em malha aberta (5,50 kWh/m²), fechada (5,36 kWh/m²) e média calculada (5,43 kWh/m²) em Abril. Na Figura 5.11 são observados os gráficos da irradiância diária do dia típico.

Figura 5.10 - Irradiância diária do dia típico - 15 minutos (Abril/2015)



Fonte: Autor.

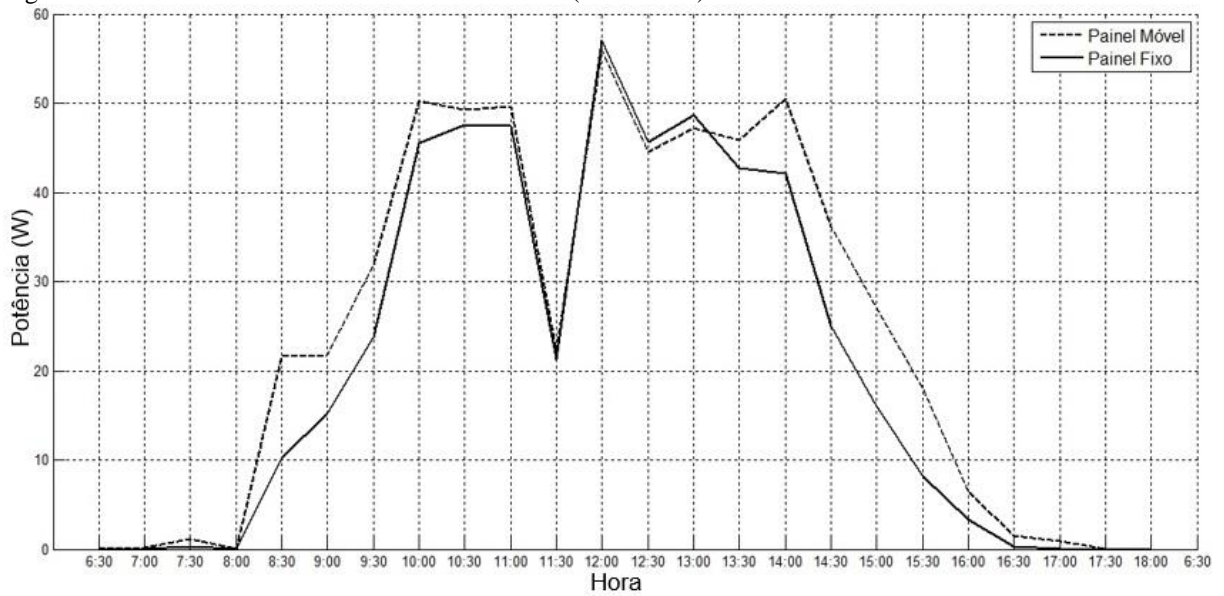
Figura 5.11 - Irradiância diária do dia típico em malha aberta - 15 minutos (Abril/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.12 é observado o gráfico da potência fornecida dos painéis móvel e fixo em malha aberta com atualização da posição angular em 15 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha aberta fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Abril foram 582,14 Wh/dia e 500,94 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia do painel móvel é superior ao fixo em 16,21%.

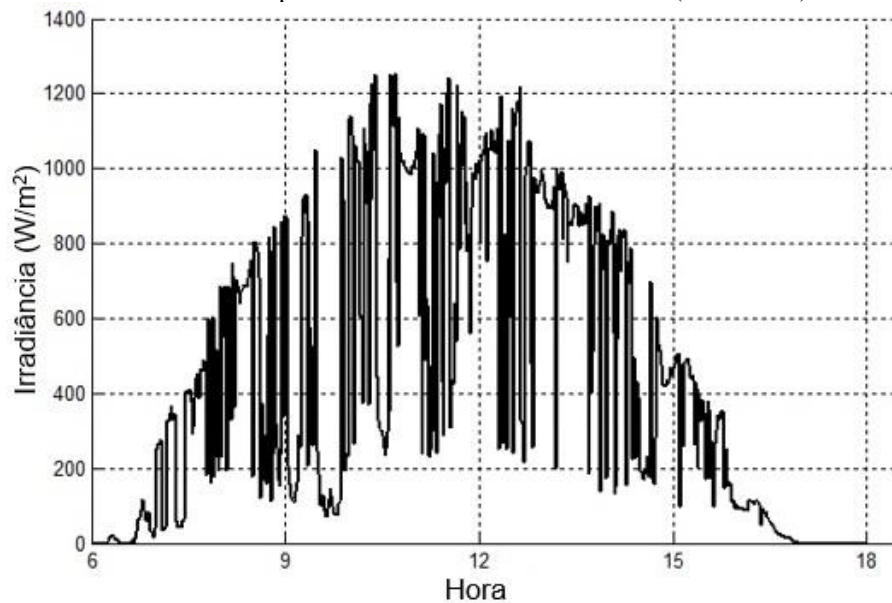
Figura 5.12 - Potência em malha aberta - 15 minutos (Abril/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.13 é observado o gráfico da irradiância diária do dia típico.

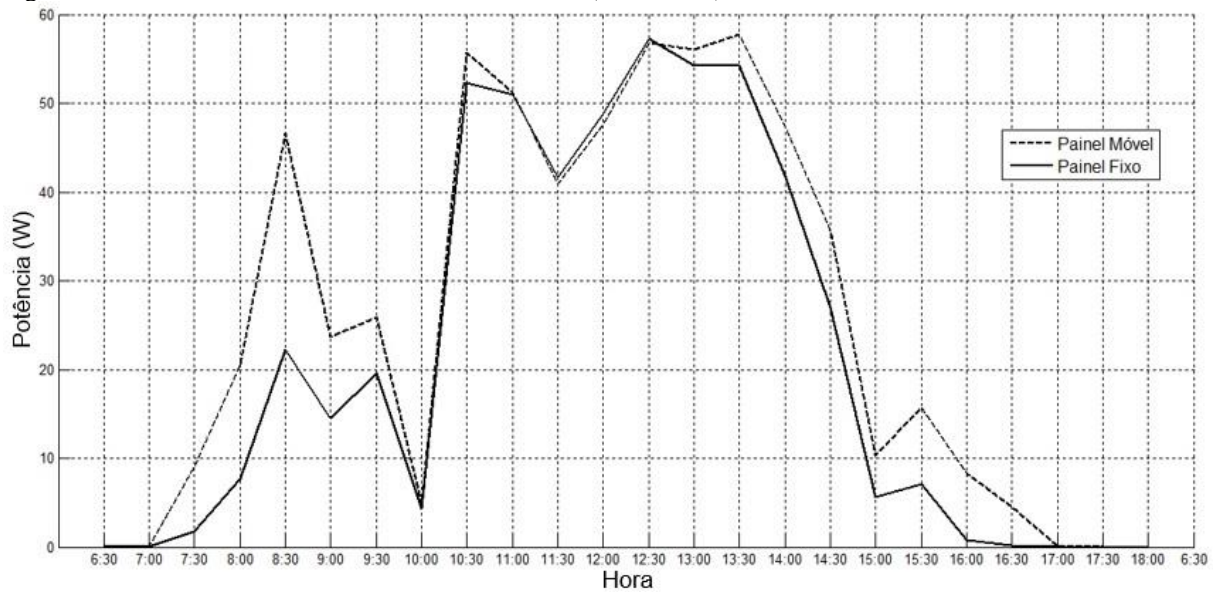
Figura. 5.13 - Irradiância diária do dia típico em malha fechada - 15 minutos (Abril/2015)



Fonte: Autor

Na Figura 5.14 é observado o gráfico da potência fornecida em Abril dos painéis móvel e fixo em malha fechada e atualização da posição angular em 15 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Abril foram 618,85 Wh/dia e 512,03 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 20,86%.

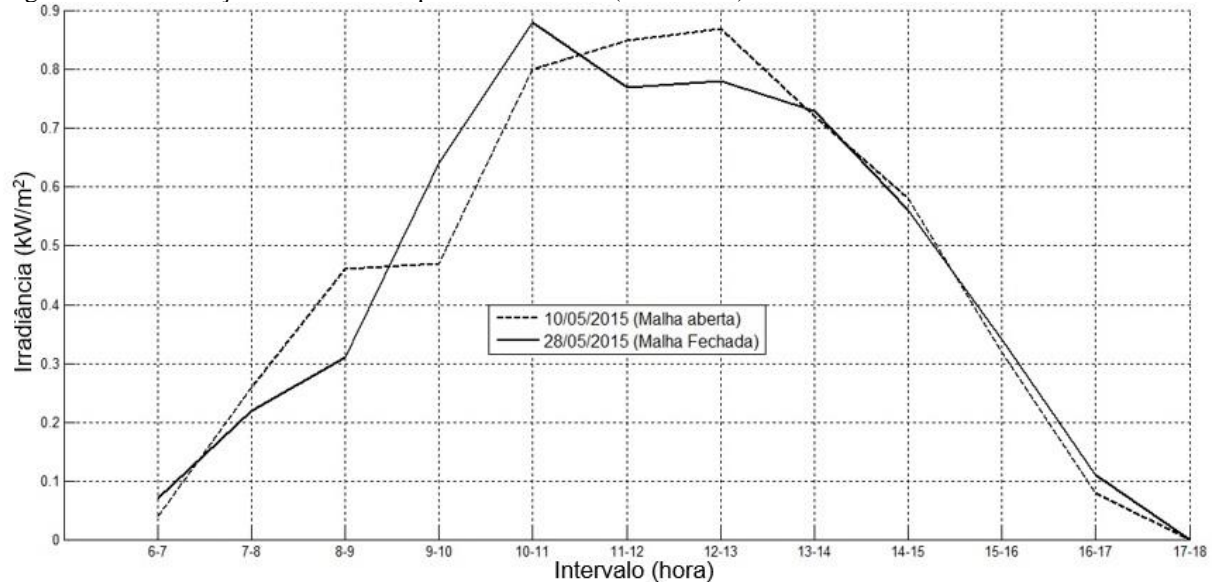
Figura 5.14 - Potência em malha fechada - 15 minutos (Abril/2015)



Fonte: Autor.

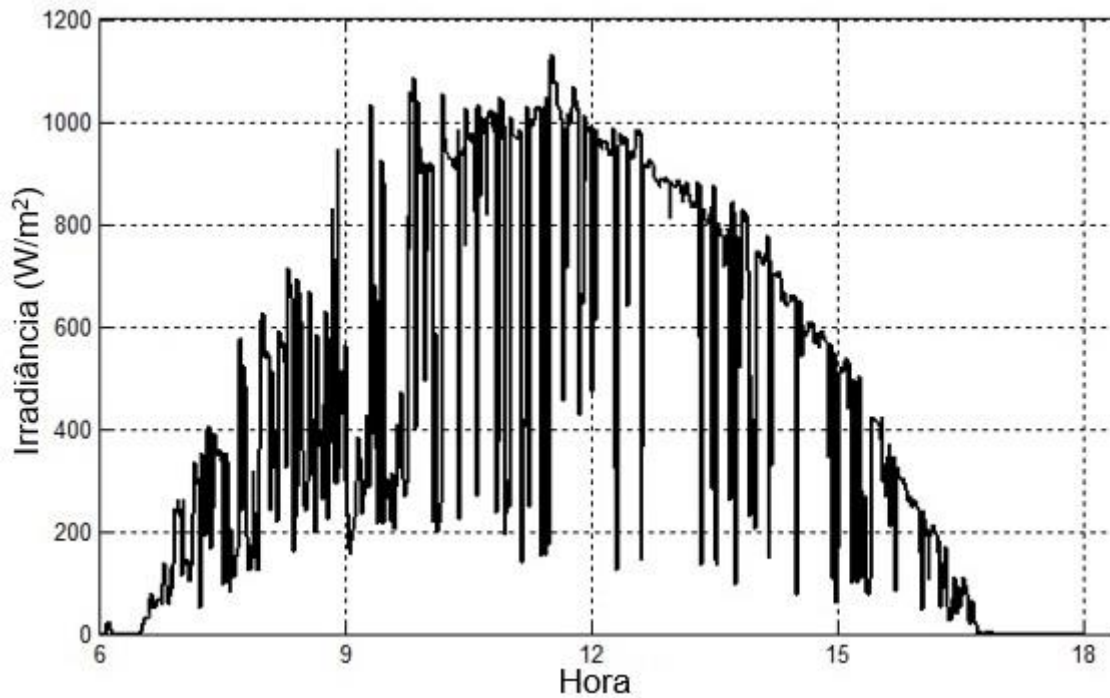
Na Figura 5.15 é observado o gráfico de irradiação dos dias típicos em malha aberta (5,45 kWh/m²), fechada (5,40 kWh/m²) e média calculada (5,43 kWh/m²) em Maio. Na Figura 5.16 são observados os gráficos da irradiância diária do dia típico.

Figura 5.15 - Irradiação diária do dia típico - 30 minutos (Maio/2015)



Fonte: Autor.

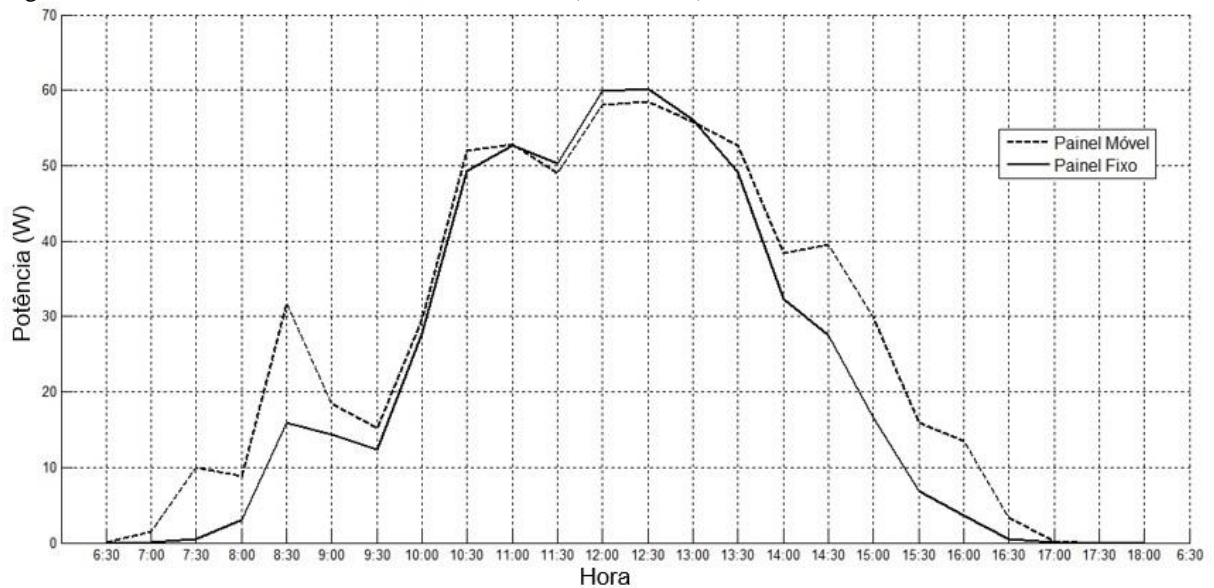
Figura 5.16 - Irradiância solar diária do dia típico em malha aberta - 30 minutos (Maio/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.17 é observado o gráfico da potência fornecida dos painéis móvel e painel fixo em malha aberta com atualização da posição angular em 30 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha aberta fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Maio foram 634,80 Wh/dia e 538,96 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 17,78%.

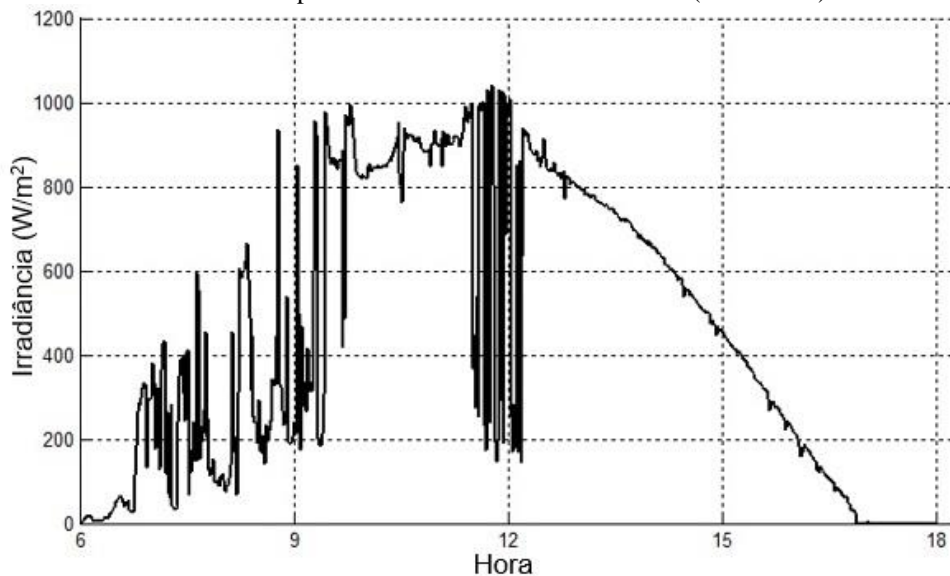
Figura 5.17 - Potência em malha aberta - 30 minutos (Maio/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.18 são observados os gráficos da irradiância diária do dia típico em malha fechada.

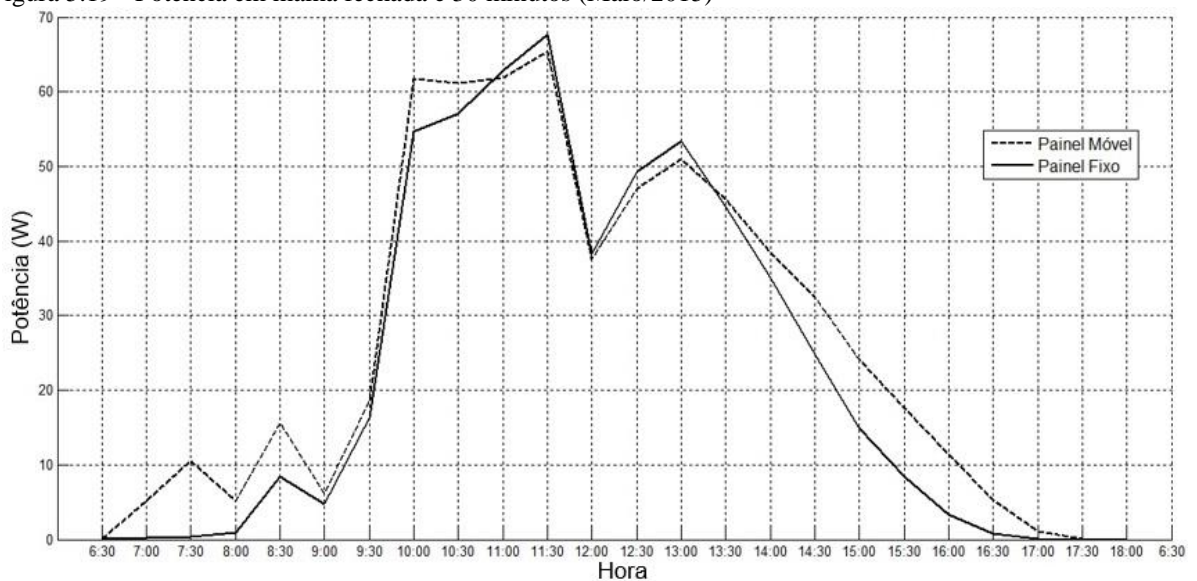
Figura 5.18 - Irradiância diária do dia típico em malha fechada - 30 minutos (Maio/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.19 é observado o gráfico da potência fornecida em Maio dos painéis móvel e fixo em malha fechada e atualização da posição angular em 30 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Maio foram 622,99 Wh/dia e 546,10 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 14,07%.

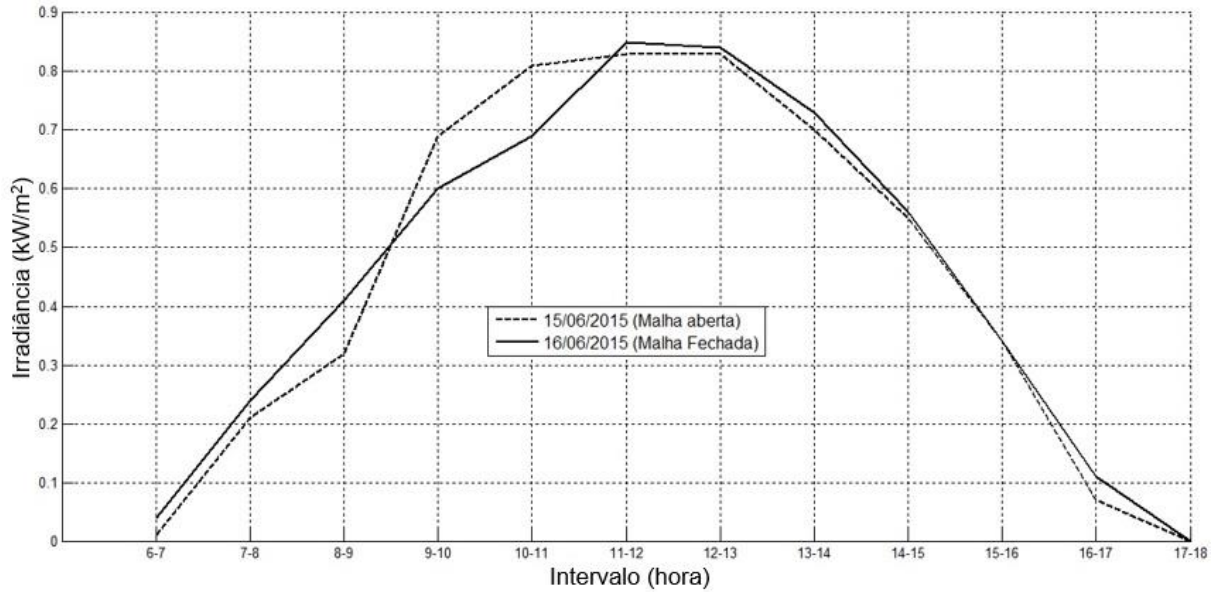
Figura 5.19 - Potência em malha fechada e 30 minutos (Maio/2015)



Fonte: Autor.

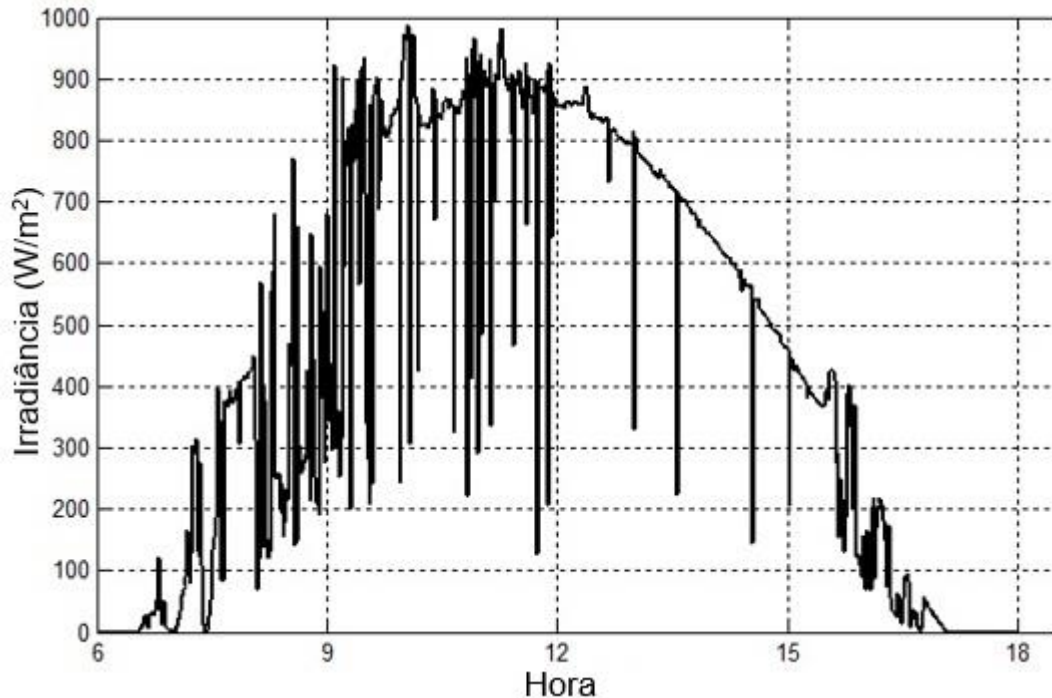
Na Figura 5.20 é observado o gráfico de irradiação dos dias típicos em malha aberta (5,38 kWh/m²), fechada (5,40 kWh/m²) e média calculada (5,39 kWh/m²) em Junho. Na Figura 5.21 são observados os gráficos da irradiação diária do dia típico.

Figura 5.20 - Irradiação diária do dia típico - 60 minutos (Junho/2015)



Fonte: Autor.

Figura 5.21 - Irradiância solar diária do dia típico em malha aberta - 60 minutos (Junho/2015)

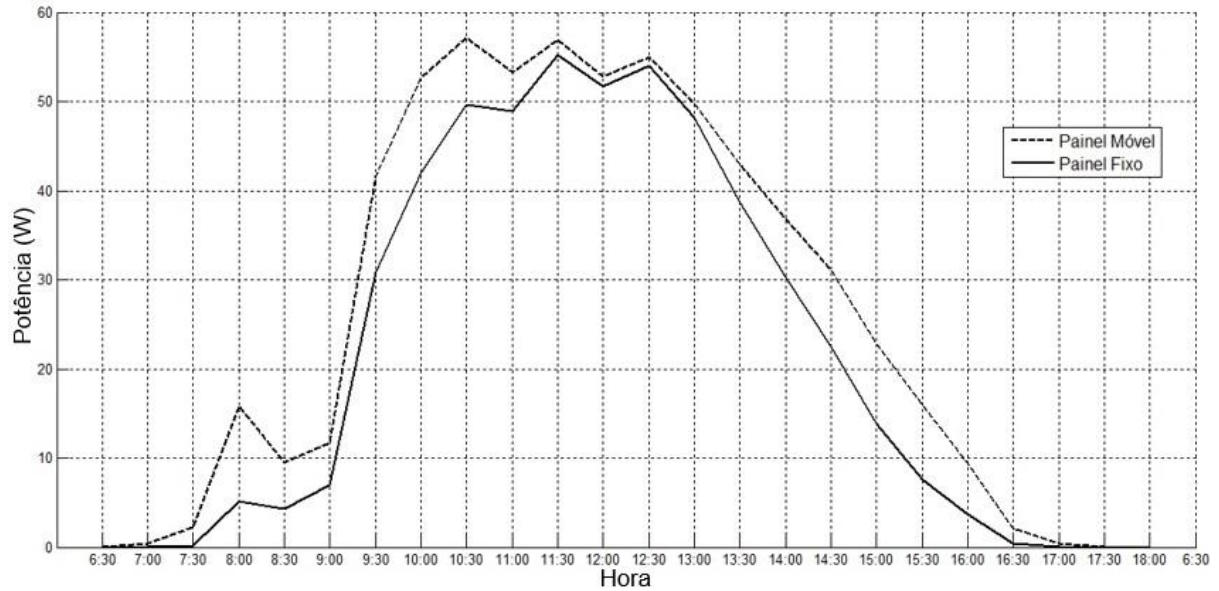


Fonte: Autor.

Na Figura 5.22 é observado o gráfico da potência fornecida dos painéis móvel e painel fixo em malha aberta com atualização da posição angular em 60 minutos. Os valores

obtidos de energia elétrica com o sistema em malha aberta fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Junho foram 620,57 Wh/dia e 514,07 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 20,72%.

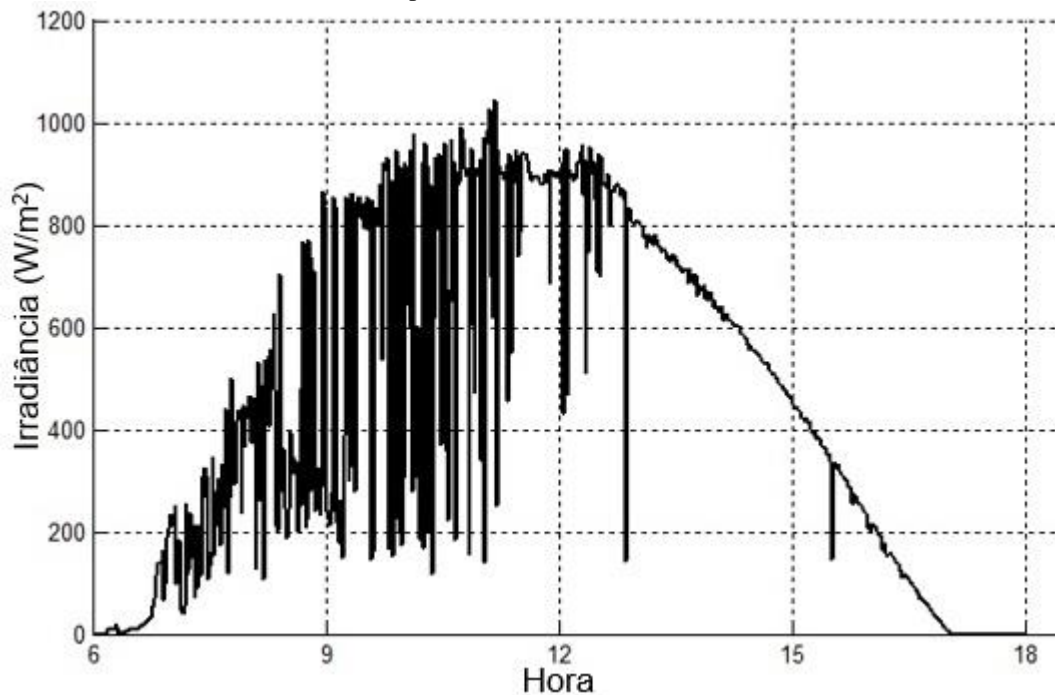
Figura 5.22 - Potência em malha aberta e 60 minutos (Junho/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.23 são observados os gráficos da irradiação diária do dia típico.

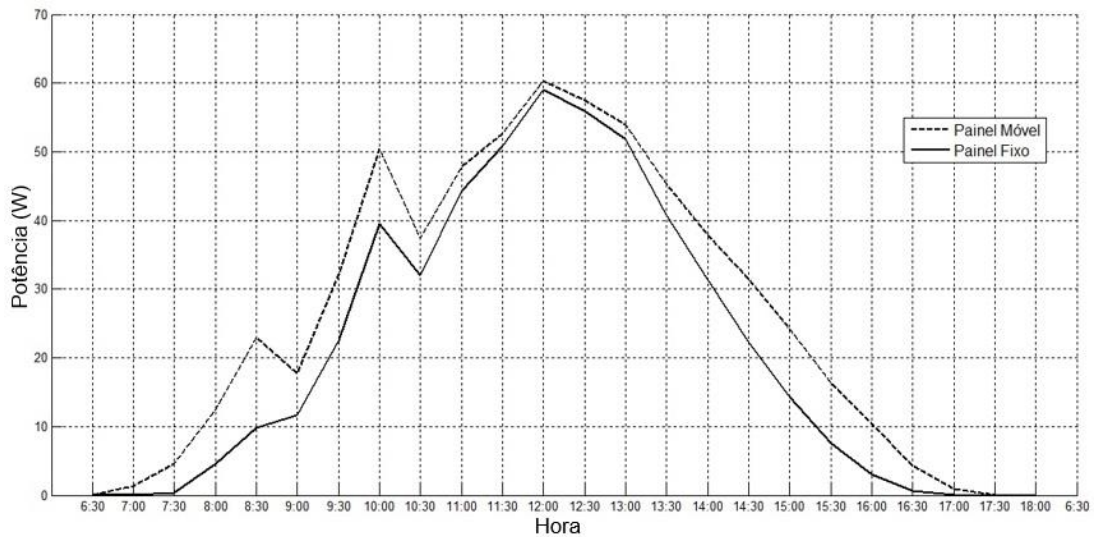
Figura 5.23 - Irradiância solar diária do dia típico em malha fechada - 60 minutos (Junho/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.24 é observado o gráfico da potência fornecida em Junho dos painéis móvel e fixo em malha fechada e atualização da posição angular em 60 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica diária com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Junho foram 677,15 Wh/dia e 531,40 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 27,42%.

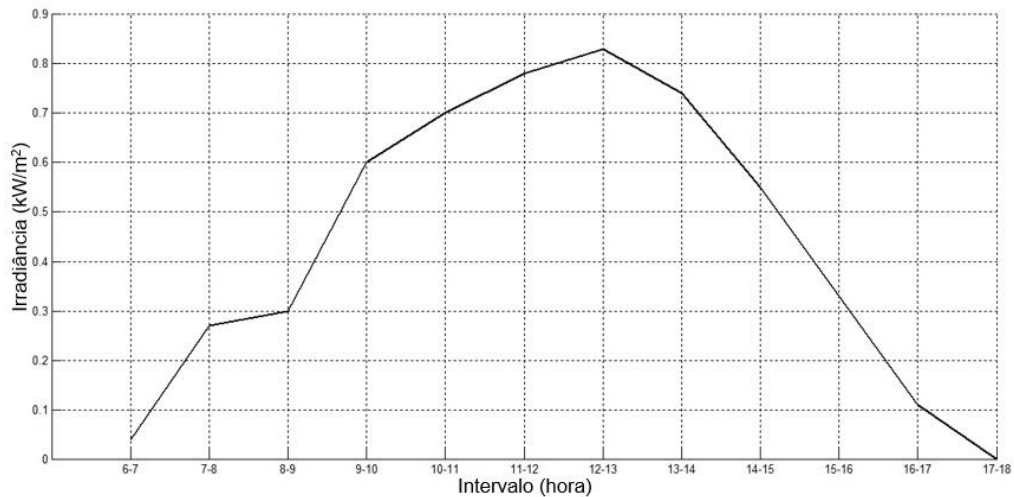
Figura 5.24 - Potência em malha fechada - 60 minutos (Junho/2015)



Fonte: Autor.

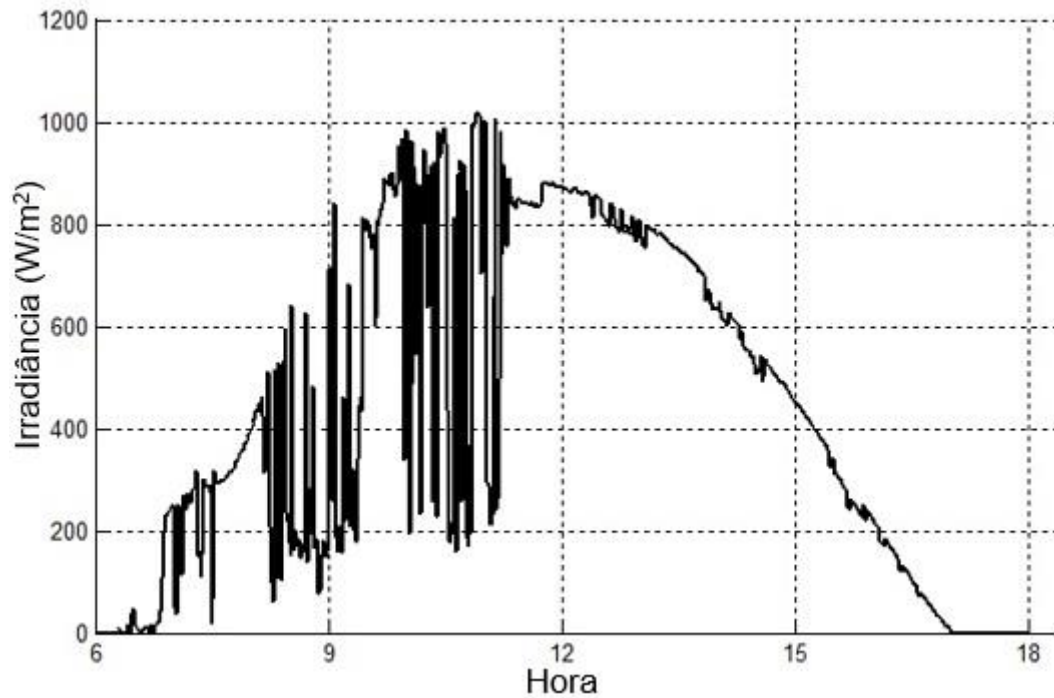
Na Figura 5.25 é observado o gráfico de irradiação do dia típico em malha fechada (5,24 kWh/m²) em Julho. Na Figura 5.26 são observados os gráficos da irradiância diária do dia típico em malha fechada.

Figura 5.25 - Irradiação diária do dia típico - 180 minutos (Julho/2015)



Fonte: Autor.

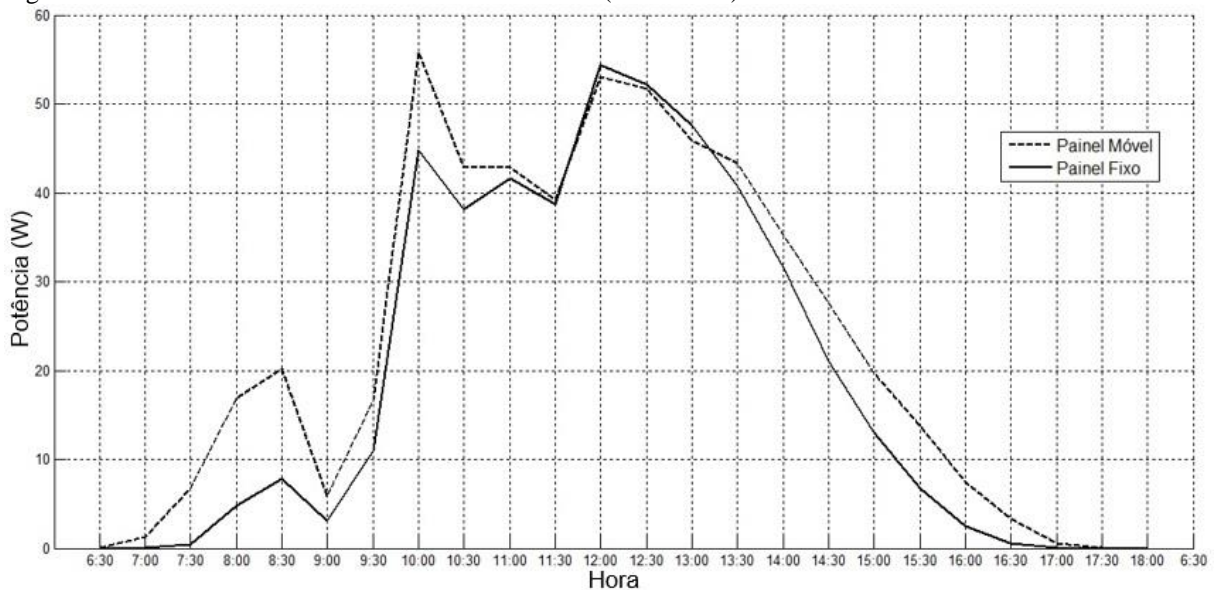
Figura 5.26 - Irradiância solar diária do dia típico em malha fechada - 180 minutos (Julho/2015)



Fonte: Autor.

Na Figura 5.27 é observado o gráfico da potência fornecida em Julho dos painéis móvel e fixo em malha fechada e atualização da posição angular em 180 minutos. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Julho foram 549,95 Wh/dia e 460,78 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o ganho de energia elétrica do painel móvel é superior ao fixo em 19,35%.

Figura 5.27 - Potência em malha fechada - 180 minutos (Julho/2015)



Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 5.11, Figura 5.13, Figura 5.16, Figura 5.18, Figura 5.21, Figura 5.23 e Figura 5.26 as irradiâncias dos dias típicos possuem valores significativos no intervalo de 7h as 17h, portanto não sendo necessário o controle de posicionamento nos intervalos de 6h as 7h e 17h as 18h, onde as irradiâncias são próximas a zero.

5.3 Energia elétrica utilizada para o funcionamento do seguidor solar

Para calcular a energia elétrica utilizada nas metodologias propostas neste trabalho (malha aberta e fechada), considerou-se o consumo de potência dos equipamentos, tempo de acionamento e quantidade de acionamentos em 15, 30, 60 e 180 minutos no intervalo de 12 horas.

A energia elétrica líquida é determinada pela diferença entre a energia elétrica gerada e a energia elétrica utilizada pelos equipamentos do seguidor solar.

5.3.1 Energia elétrica utilizada no painel fixo (com móvel em malha aberta)

Considerando que o painel alimenta diretamente a carga, o consumo de energia elétrica do painel fixo é nulo. A energia elétrica do sistema é fornecida na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Energia elétrica do painel fixo (com móvel em malha aberta).

| Mês | Intervalo | Painel | Energia elétrica gerada (Wh/dia) | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | Energia elétrica líquida (Wh/dia) |
|-----|-----------|--------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Abr | 15 min | Fixo | 500,94 | 0,0 | 500,94 |
| Mai | 30 min | Fixo | 538,96 | 0,0 | 538,96 |
| Jun | 60 min | Fixo | 514,07 | 0,0 | 514,07 |

Fonte: Autor.

5.3.2 Energia elétrica utilizada no painel móvel em malha aberta

Na Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros técnicos para o funcionamento dos equipamentos utilizados para o seguidor solar do LEA em malha aberta. Efetuando o balanço da energia fornecida e utilizada obtêm-se o ganho líquido do sistema.

Tabela 5.3 - Parâmetros técnicos dos equipamentos.

| Item | Tensão (V) | Corrente (A) | Potência (W) |
|----------------|------------|--------------|--------------|
| Motor de passo | 5 | 4,7 | 23,5 |
| CLP | 24 | 0,128 | 3,072 |
| Painel | 17,4 | 5,02 | 87 |

Fonte: Autor.

Foi calculado através da Equação 5.1 o número de pulsos do motor de passo de acordo com o incremento angular de posicionamento do painel, assim como foi estabelecido através da programação do CLP o tempo de chaveamento das bobinas do motor de passo em 10 ms. Assim, o tempo de chaveamento para o posicionamento do painel é dado pela Equação 5.2.

$$t_{pp} = t_{cb} \cdot n_c \quad (5.1)$$

Em que,

t_{pp} - Tempo de posicionamento do painel (segundos)

t_{cb} - Tempo de chaveamento das bobinas (segundos)

n_c - Número de chaveamentos das bobinas ou pulsos

O tempo de posicionamento total diário é determinado pela Equação 5.2.

$$t_{pt} = t_{pp} \cdot n_p \quad (5.2)$$

Em que,

t_{pt} - Tempo total de posicionamento do painel (segundos)

n_p - Número de posicionamentos diários

Na Tabela 5.4 são apresentados os intervalos e tempos de posicionamentos, considerando o chaveamento das bobinas em 10 ms, o acionamento do seguidor solar nos intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos.

Tabela 5.4 - Tempos de posicionamento para chaveamento de 10 ms.

| Mês | Posicionamento | Número de posicionamentos (n_p) | Tempo (t_{pp}) | Tempo total (t_{pt}) | Horas/Dia (12h) |
|-----|----------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|
| Abr | 15 min | 48 | 0,44 s | 21,12 s | 0,0059 h |
| Mai | 30 min | 24 | 0,89 s | 21,36 s | 0,0059 h |
| Jun | 60 min | 12 | 1,78 s | 21,36 s | 0,0059 h |
| Jul | 180 min | 3 | 5,56 s | 16,68 s | 0,0046 h |

Fonte: Autor.

Conforme observado na tabela 5.4 os tempos de funcionamento diários de chaveamento dos relés de acionamento do motor de passo são próximos para os intervalos de tempo de 15, 30 e 60 minutos; este fato ocorre devido ao número de chaveamentos necessários para efetuar o deslocamento angular do painel em 100 graus em todos os intervalos citados, exceto o intervalo de 180 minutos em que, o último tempo de deslocamento coincide com o horário estabelecido para o retorno do painel para a posição nascente. Ou seja, os deslocamentos angulares ocorrem as 9:00, 12:00 e 15:00, sendo o próximo movimento estabelecido as 18:00 provocando o retorno imediato do painel da posição em que se encontra as 15:00 para a posição nascente.

Na Tabela 5.5 são apresentados os consumos de energia elétrica do motor de passo, considerando que o seguidor solar é acionado nos intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos em malha aberta, respectivamente.

Tabela 5.5 - Consumo de energia elétrica do motor de passo com potência de 23,5 W.

| Mês | Intervalo | Tempo (h/dia) | Energia elétrica (Wh/dia) |
|-----|-----------|---------------|---------------------------|
| Abr | 15 min | 0,0059 h | 0,14 |
| Mai | 30 min | 0,0059 h | 0,14 |
| Jun | 60 min | 0,0059 h | 0,14 |
| Jul | 180 min | 0,0046 h | 0,11 |

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.6 é apresentado o consumo de energia elétrica do CLP, considerando que o seguidor solar é acionado nos intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos em malha aberta, respectivamente.

Embora o tempo de intervalo do posicionamento angular para os meses de abril, maio, junho e julho sejam diferentes, o tempo de funcionamento do CLP é igual em todos os

meses, portanto a energia elétrica consumida do CLP é o produto da potência pelo tempo de funcionamento.

Tabela 5.6 - Consumo de energia elétrica do CLP com potência de 3,072 W.

| Mês | Intervalo | Tempo (h/dia) | Energia elétrica (Wh/dia) |
|-----|-----------|---------------|---------------------------|
| Abr | 15 min | 24 | 73,728 |
| Mai | 30 min | 24 | 73,728 |
| Jun | 60 min | 24 | 73,728 |
| Jul | 180 min | 24 | 73,728 |

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.7 são observadas a energia elétrica líquida geradas dos sistemas utilizando painel móvel em malha aberta.

Tabela 5.7 – Energia elétrica líquida do sistema com painel móvel em malha aberta.

| Mês | Intervalo | Painel | Energia elétrica gerada (Wh/dia) | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | Energia elétrica líquida (Wh/dia) |
|-----|-----------|--------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Abr | 15 min | Móvel | 582,14 | 73,87 | 508,27 |
| Mai | 30 min | Móvel | 634,80 | 73,87 | 560,93 |
| Jun | 60 min | Móvel | 620,57 | 73,87 | 546,70 |

Fonte: Autor.

Portanto, o ganho líquido do painel móvel em relação ao painel fixo para o intervalo de 15 minutos (Abril), 30 minutos (Maio) e 60 minutos (Junho) em malha aberta é 1,5%, 4,1% e 6,3%, respectivamente.

Quanto aos intervalos de posicionamento angular do painel móvel, em malha aberta, observa-se que o ganho de energia elétrica do intervalo de 30 minutos em relação aos intervalos de 15 e 60 minutos são respectivamente 10,4% e 2,6%.

5.3.3 Energia elétrica utilizada no painel fixo (com móvel em malha fechada)

Assim como no sistema em malha aberta, o painel alimenta diretamente a carga, portanto, o consumo de energia elétrica do painel fixo é nulo. A energia elétrica líquida fornecida pelo sistema é observada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Energia elétrica líquida do painel fixo (com móvel em malha fechada).

| Mês | Intervalo | Painel | Energia elétrica gerada (Wh/dia) | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | Energia elétrica líquida (Wh/dia) |
|-----|-----------|--------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Mar | 15 min | Fixo | 217,45 | 0,0 | 217,45 |
| Abr | 15 min | Fixo | 512,03 | 0,0 | 512,03 |
| Mai | 30 min | Fixo | 546,10 | 0,0 | 546,10 |
| Jun | 60 min | Fixo | 531,40 | 0,0 | 531,40 |
| Jul | 180 min | Fixo | 460,78 | 0,0 | 460,78 |

Fonte: Autor.

5.3.4 Energia elétrica utilizada no painel móvel em malha fechada

Para calcular a energia elétrica líquida do painel móvel em malha fechada, utiliza-se os mesmos parâmetros técnicos dos equipamentos (Tabela 5.3), tempos de posicionamento para o chaveamento de 10 ms (Tabela 5.4), consumo de energia elétrica do motor de passo (Tabela 5.5) e consumo de energia elétrica do CLP (Tabela 5.6).

Conforme mencionado anteriormente, o programa de controle do posicionamento do painel implementado no CLP executa a cada 5 minutos a verificação do posicionamento angular do painel e em caso de erro de posicionamento, executa o chaveamento das bobinas do motor de passo a fim de eliminar o erro entre a posição ideal (referência ou *set point*- SP) e a posição angular atual (variável do processo - PV).

Ainda mencionado anteriormente, o erro de posição pode ocorrer pela inércia do movimento ou fenômenos climáticos, em especial os ventos. Assim, a magnitude do erro é uma variável complexa para dimensionar, portanto não é possível prever quantos chaveamentos e tempo necessários para corrigir o posicionamento em cada atualização da posição angular.

Na presente pesquisa serão consideradas correções em todos os intervalos de 5 minutos e erro de posicionamento angular de 5 graus. Na Tabela 5.9 são apresentados os intervalos e tempos de posicionamentos, considerando o chaveamento das bobinas em 10 ms e correção do erro de 5 graus, o acionamento do seguidor solar nos intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos.

O tempo de posicionamento do painel (t_{pp}) corresponde ao produto do número de chaveamentos necessário do motor de passo para deslocar o painel em 5 graus e o tempo de chaveamento dos relés (10 ms). O tempo total de posicionamento diário do painel (t_{pt}) é determinado pelo produto do tempo de posicionamento do painel e do número de posicionamentos do painel (n_p) para efetuar a correção do erro, que é determinado pelo

números de intervalos de 5 minutos existentes nos intervalos de posicionamentos estabelecidos (15, 30, 60 e 180 minutos).

Tabela 5.9 - Tempos de posicionamento para chaveamento de 10 ms e erro de 5 graus.

| Mês | Posicionamento | Número de posicionamentos - correção do erro (np) | Tempo (tpp) | Tempo total (tpt) | Horas/Dia (12h) |
|-----|----------------|---|-------------|-------------------|-----------------|
| Abr | 15 min | 96 | 1,11 s | 106,56 s | 0,36 h |
| Mai | 30 min | 120 | 1,11 s | 133,20 s | 0,44 h |
| Jun | 60 min | 132 | 1,11 s | 146,52 s | 0,49 h |
| Jul | 180 min | 140 | 1,11 s | 155,40 s | 0,52 h |

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.10 são observados os consumos de energia elétrica do motor de passo para correção da posição angular do painel de 5 graus para os intervalos de 5 minutos.

Tabela 5.10 - Consumo de energia elétrica do motor de passo para os intervalos de 5 minutos.

| Mês | Intervalo | Tempo (h/dia) | Energia elétrica (Wh/dia) |
|-----|-----------|---------------|---------------------------|
| Abr | 15 min | 0,36 h | 8,46 |
| Mai | 30 min | 0,44 h | 10,34 |
| Jun | 60 min | 0,49 h | 11,52 |
| Jul | 180 min | 0,52 h | 12,22 |

Fonte: Autor.

A Energia elétrica líquida fornecida é calculada pela diferença entre a energia elétrica gerada e a energia elétrica consumida pelo sistema. Na Tabela 5.11 são observadas as energias elétricas líquidas do sistema utilizando painel móvel em malha fechada.

Tabela 5.11 - Energia elétrica líquida do sistema com painel móvel em malha fechada.

| Mês | Intervalo | Painel | Energia elétrica gerada (Wh/dia) | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | Energia elétrica líquida (Wh/dia) |
|-----|-----------|--------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Mar | 15 min | Móvel | 255,93 | 82,33 | 173,60 |
| Abr | 15 min | Móvel | 618,85 | 82,33 | 536,52 |
| Mai | 30 min | Móvel | 622,99 | 84,21 | 538,78 |
| Jun | 60 min | Móvel | 677,15 | 85,38 | 591,77 |
| Jul | 180 min | Móvel | 549,95 | 86,06 | 463,89 |

Fonte: Autor.

Portanto, o ganho líquido do painel móvel em relação ao painel fixo para o intervalo de 15 minutos (Março), 15 minutos (Abril), 30 minutos (Maio), 60 minutos (Junho) e 180 minutos (Julho) em malha fechada foi -20,2%, 4,8%, -1,3%, 11,3% e 0,7%, respectivamente.

Quanto aos intervalos de posicionamento angular do painel, em malha fechada, observa-se que o ganho de energia elétrica do intervalo de 60 minutos em relação aos intervalos de 15 (Março), 15 (Abril), 30 e 180 minutos são respectivamente 240,9%, 10,3%, 9,8% e 27,6%.

Na Tabela 5.12 é apresentado o resumo dos dados coletados de irradiação e dos resultados dos ganhos e geração de energia elétrica dos painéis fixo e móvel para os intervalos de 15, 30, 60 e 180 minutos.

Tabela 5.12 - Tabela resumo dos dados de irradiação e dos resultados dos ganhos e geração de energia elétrica.

| Mês | Intervalo | Variável | Malha / Painel / Ganho | | | | | |
|-----|-----------|--------------------------------------|------------------------|--------|-------|---------------|--------|-------|
| | | | Malha Aberta | | | Malha Fechada | | |
| | | | Móvel | Fixo | Ganho | Móvel | Fixo | Ganho |
| Mar | 15 min | Irradiação (kWh/m ²) | - | - | - | 3,63 | | |
| | | Energia elétrica líquida (Wh/dia) | - | - | - | 173,60 | 217,45 | 20,2% |
| | | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | - | - | - | 82,33 | 0,0 | |
| Abr | 15 min | Irradiação (kWh/m ²) | 5,50 | | | 5,36 | | |
| | | Energia elétrica líquida (Wh/dia) | 508,27 | 500,94 | 1,5% | 536,52 | 512,03 | 4,8% |
| | | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | 73,87 | 0,0 | | 82,33 | 0,0 | |
| Mai | 30 min | Irradiação (kWh/m ²) | 5,45 | | | 5,40 | | |
| | | Energia elétrica líquida (Wh/dia) | 560,93 | 538,96 | 4,1% | 538,78 | 546,10 | -1,3% |
| | | Energia elétrica utilizada (Wh /dia) | 73,87 | 0,0 | | 84,21 | 0,0 | |
| Jun | 60 min | Irradiação (kWh/m ²) | 5,38 | | | 5,40 | | |
| | | Energia elétrica líquida (Wh/dia) | 546,7 | 514,07 | 6,3% | 591,77 | 531,40 | 11,3% |
| | | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | 73,87 | 0,0 | | 85,38 | 0,0 | |
| Jul | 180 min | Irradiação (kWh/m ²) | - | - | - | 5,24 | | |
| | | Energia elétrica líquida (Wh/dia) | - | - | - | 463,89 | 460,78 | 0,7% |
| | | Energia elétrica utilizada (Wh/dia) | - | - | - | 86,06 | 0,0 | |

Fonte: Autor.

A energia elétrica global é o somatório independente da energia elétrica líquida do sistema painel fixo, painel móvel em malha aberta e painel móvel em malha fechada.

O somatório das energias elétricas globais do painel móvel no período dos meses de Abril a Junho em malha aberta e no período dos meses de Março a Julho em malha fechada foram respectivamente 1615,9 Wh /dia e 2304,56 Wh /dia. Considerando o somatório das energias elétricas globais reais do painel fixo comparado ao painel móvel em malha aberta e fechada constatou-se que a geração de energia elétrica do painel móvel em ambos os sistemas foram superiores aproximadamente 4% e 5% em relação ao fixo.

5.4 Análise financeira do seguidor solar

O sistema de produção de energia elétrica do LEA, através da energia solar, utiliza apenas um painel fotovoltaico de baixa potência. Neste trabalho foram utilizados os dados das potências coletadas nos painéis fixo e móvel para simular um sistema semelhante ao estudado por Nagahara, (2009), em que considera o levantamento de cargas dos aparelhos elétricos básicos de uma casa simples em que são na maioria das vezes compostas de equipamentos de baixo consumo, localizadas em zona rural, distantes da rede de energia e que apresentam características similares. Na Tabela 5.13 são apresentados os equipamentos e cargas de uma casa simples.

Tabela 5.13 - Equipamentos e cargas de uma casa simples.

| Item | Pot (W) | Qte | Horas | kWh | kWh/mês |
|------------------|---------|-----|-------|-------|---------|
| Lâmpada sala | 15 | 01 | 04 | 60 | 1,8 |
| Lâmpada quarto | 09 | 02 | 04 | 72 | 2,2 |
| Lâmpada banheiro | 09 | 01 | 02 | 18 | 0,5 |
| Lâmpada cozinha | 09 | 01 | 04 | 36 | 1,1 |
| Geladeira | 80 | 01 | 12 | 960 | 28,8 |
| TV | 60 | 01 | 01 | 60 | 1,8 |
| Bomba d'água | 50 | 01 | 03 | 150 | 4,5 |
| Total | 241 | | Total | 1.356 | 40,7 |

Fonte: NAGAHARA, 2009.

Adicionado às cargas apresentadas por Nagahara (2009), foram consideradas as cargas necessárias para acionar os sistemas de rastreamento do seguidor solar em malha aberta e fechada.

Para a análise financeira foi selecionado o cenário que foi submetido aos ensaios em malha aberta e malha fechada que apresentou o maior consumo de energia diário. Portanto, foi considerado o intervalo de posicionamento angular de 60 minutos e a condição em malha fechada, em que o seguidor apresentou o maior consumo de energia ($\approx 85,48$ Wh/dia), portanto o pior cenário. O consumo de energia elétrica é calculado pelo somatório do consumo de energia elétrica do posicionamento angular (0,14 Wh/dia), consumo de energia elétrica da correção do posicionamento angular para cada 5 minutos (11,51 Wh/dia) e consumo de energia elétrica do CLP (73,728 Wh/dia). Na Tabela 5.14 são observados as características e período de funcionamento dos equipamentos utilizados no seguidor solar para o intervalo de posicionamento angular de 60 minutos e a condição em malha fechada.

Tabela 5.14 - Características e período de funcionamento dos equipamentos utilizados no seguidor solar em malha fechada

| Item | Tensão (V) | Corrente (A) | Potência (W) | Horas/dia | Wh/dia |
|----------------------------|------------|--------------|--------------|-----------|--------|
| Motor de passo | 5 | 4,7 | 23,5 | 0,49 | 11,75 |
| CLP | 24 | 0,128 | 3,072 | 24 | 73,728 |
| Total de energia consumida | | | | | 85,48 |

Fonte: Autor.

Embora no protótipo do seguidor solar do LEA foi utilizado apenas um seguidor solar, foram simulados adicionando dispositivos seguidores com painéis FV, mantendo as mesmas características de produção de energia elétrica do equipamento testado, para suprir a demanda de energia elétrica da situação apresentada por Nagahara, (2009). Conforme a Equação 3.1 foram adicionados nove painéis para suprir a demanda do sistema hipotético.

Geralmente as aplicações reais de seguidores solares utilizam sistemas microcontrolados, mas foi utilizado no experimento, devido à disponibilidade no LEA, um CLP Twido, para o controle de posicionamento angular. Assim, o estudo da análise financeira será baseado nos custos de um sistema microcontrolado e também com a utilização do CLP. Na Tabela 5.15 são apresentados os custos de produção do seguidor solar utilizando microcontrolador e CLP.

Tabela 5.15 - Custos de produção do seguidor solar do LEA-UFC

| Item | Qtde | Móvel | | Fixo |
|--|------|---------------|---------------|--------------|
| | | Malha Fechada | Malha Aberta | |
| Painel Fotovoltaico Kyocera KC85T | 9 | R\$ 4.500,00 | R\$ 4.500,00 | R\$ 4.500,00 |
| Motor de passo | 9 | R\$ 1.971,00 | R\$ 1.971,00 | R\$ 0,00 |
| sensor red switch | 18 | R\$ 45,00 | R\$ 45,00 | R\$ 0,00 |
| Controlador e Interface (Microcontrolador) | 1 | R\$ 150,00 | R\$ 150,00 | R\$ 0,00 |
| CLP, módulos de expansão e interface | 1 | R\$ 12.000,00 | R\$ 12.000,00 | R\$ 0,00 |
| Plataforma (material e mão de obra) | 9 | R\$ 2.700,00 | R\$ 2.700,00 | R\$ 900,00 |
| Cabeamento | 9 | R\$ 270,00 | R\$ 270,00 | R\$100,00 |
| Fonte 24 VDC | 1 | R\$ 90,00 | R\$ 90,00 | R\$ 0,00 |
| Manutenção | 1 | R\$ 200,00 | R\$ 200,00 | R\$ 100,00 |
| Inversor Xantrex Xpower 1000 (1000W / 120Vac / 60Hz) | 1 | R\$ 1.583,00 | R\$ 1.583,00 | R\$ 1.583,00 |
| Controlador de Carga Xantrex C60 60A 12/24V | 1 | R\$ 859,00 | R\$ 859,00 | R\$ 859,00 |
| Bateria de ciclo profundo 12v 200 ah, marca Kanglida | 2 | R\$ 1.582,42 | R\$ 1.582,42 | R\$ 1.582,42 |
| Sensor realimentação (potenciômetro) | 1 | R\$ 72,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Total com Microcontrolador | | R\$ 14.022,42 | R\$ 13.950,42 | |
| Total com CLP | | R\$ 25.872,42 | R\$ 25.800,42 | |
| Total Fixo | | | | R\$ 9.624,42 |

Fonte: Autor.

Conforme mencionado foram utilizadas, como referência de aplicação da geração e fornecimento de energia elétrica com painéis FV, as cargas elétricas de um sistema semelhante ao estudado por Nagahara, (2009). Ainda, foi mencionado que a planta do LEA utiliza apenas um painel fotovoltaico de baixa potência, ou seja, objetivando analisar apenas como um estudo hipotético os dados de potência coletados pelos painéis FV do LEA, fez-se necessário o acréscimo de módulos FV e a inserção de componentes como baterias, inversores e controlador de carga para suprir a potência necessária e das cargas alternadas citadas em Nagahara, (2009), além de determinar uma situação economicamente viável do projeto.

Conforme mencionado foram utilizadas, como referência de aplicação da geração e fornecimento de energia elétrica com painéis FV, as cargas elétricas de um sistema semelhante ao estudado por Nagahara, (2009). Ainda, foi mencionado que a planta do LEA utiliza apenas um painel fotovoltaico de baixa potência, ou seja, objetivando analisar apenas como um estudo hipotético os dados de potência coletados pelos painéis FV do LEA, fez-se necessário o acréscimo de módulos FV e a inserção de componentes como baterias, inversores e controlador de carga para suprir a potência necessária e das cargas alternadas citadas em Nagahara, (2009), além de determinar uma situação economicamente viável do projeto.

Para a análise do VPL e *payback* descontado do seguidor solar proposto para o LEA, foi definido a taxa mínima de atratividade (TMA) e taxa de desconto (*i*) em 6,87%, valor referente a revisão tarifária da Coelce (CE) para os consumidores residenciais (Classe B1), aprovada pela reunião pública ordinária da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 07/04/2015.

Para determinar o fluxo de caixa anual do seguidor solar (R\$/ano) para um painel FV, foram adotadas as energias registradas no intervalo de 60 minutos do painel fixo (514,07 Wh/dia) e móvel em malha aberta (546,70 Wh/dia) e painel fixo (531,46 Wh/dia) e móvel em malha fechada (591,77 Wh/dia) do dia típico e as tarifas (t_{COELCE}) para as bandeiras verde (R\$ 0,61141/kWh), amarela (R\$ 0,64798/kWh) e vermelha (R\$ 0,69187/kWh), conforme os valores adotados pela Companhia de Eletricidade do Ceará (COELCE, 2015). O fluxo de caixa é a projeção dos períodos futuros de todas as atividades financeiras do projeto, indica como será o saldo de caixa para o período projetado. Foi estabelecido na análise do seguidor solar um fluxo de caixa constante para cada bandeira tarifária, que leva em consideração o produto entre a tarifa adotada pela COELCE e o custo da energia elétrica produzida no ano, que é determinada pela Equação 5.3.

$$FC = \frac{360 \cdot E}{1000} \cdot t_{COELCE} \cdot N_{fv} \quad (5.3)$$

Em que,

| | | |
|--------------|---|--|
| FC | - | Fluxo de caixa (R\$); |
| E | - | Energia elétrica dos painéis móvel e fixo; |
| t_{COELCE} | - | Tarifa da Coelce (R\$/kWh); |
| N_{fv} | - | Número de painéis FV. |

Na Tabela 5.16 são observados fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando um painel fixo e móvel em malha aberta e um painel fixo e móvel em malha fechada.

Tabela 5.16 - Fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando as malhas aberta e fechada para um painel FV.

| Malha | Energia (W.h/dia) | E (kWh/mês) | Tarifa/ custo | R\$/ano | Tarifa/ custo | R\$/ano | Tarifa/ custo | R\$/ano |
|---------------------|----------------------|----------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
| | | | VERDE | | AMARELA | | VERMELHO | |
| | | | R\$ 0,61141/kWh | | R\$ 0,64798/kWh | | R\$ 0,69187/kWh | |
| Fixo Malha Aberta | 514,07 | 15,42 | R\$ 9,43 | R\$ 113,15 | R\$ 9,99 | R\$ 119,92 | R\$ 10,67 | R\$ 128,04 |
| Fixo Malha Fechada | 531,4 | 15,94 | R\$ 9,75 | R\$ 116,97 | R\$ 10,33 | R\$ 123,96 | R\$ 11,03 | R\$ 132,36 |
| Móvel Malha Aberta | 546,70 | 16,40 | R\$ 10,03 | R\$ 120,33 | R\$ 10,63 | R\$ 127,53 | R\$ 11,35 | R\$ 136,17 |
| Móvel Malha Fechada | 591,77 | 17,75 | R\$ 10,85 | R\$ 130,25 | R\$ 11,50 | R\$ 138,04 | R\$ 12,28 | R\$ 147,39 |

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.17 são observados a análise financeira utilizando o microcontrolador.

Tabela 5.17 - Análise financeira para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando o painel fixo e painel móvel em malha aberta (Microcontrolador).

| Bandeira / itens | VPL Fixo | TIR Fixo | VPL Malha aberta | TIR Malha aberta | Tempo | Payback Simples Fixo | Payback Descontado Fixo | Payback Simples Malha aberta | Payback Descontado Malha aberta |
|-------------------|--------------|----------|------------------|------------------|-------|----------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Bandeira verde | R\$ 5.066,33 | 10,58% | R\$ 1.672,81 | 7,76% | anos | 9 | 15 | 12 | 32 |
| | | | | | meses | 5 | 9 | 10 | 7 |
| | | | | | dias | 12 | 9 | 17 | 19 |
| Bandeira amarela | R\$ 5.945,02 | 11,21% | R\$ 2.607,27 | 8,23% | anos | 8 | 14 | 12 | 27 |
| | | | | | meses | 11 | 3 | 1 | 1 |
| | | | | | dias | 0 | 10 | 25 | 13 |
| Bandeira vermelha | R\$ 6.999,59 | 11,97% | R\$ 3.728,78 | 8,78% | anos | 8 | 12 | 11 | 22 |
| | | | | | meses | 4 | 10 | 4 | 11 |
| | | | | | dias | 6 | 2 | 17 | 4 |

Fonte: Autor.

Conforme observado na Tabela 5.17, os valores de VPL e da TIR utilizando sistemas microcontrolados com seguidor solar em malha aberta apresentam valores positivos e indicam que a soma dos recebimentos descontados, considerando a TMA em 6,87% para a data inicial do projeto, supera ou iguala os desembolsos, igualmente descontados, (à mesma taxa), o que torna o projeto aceitável. Ainda percebe-se que a recuperação do investimento ocorre, considerando o *payback* descontado, aos trinta e dois anos, sete meses e dezenove dias

para bandeira verde, vinte e sete anos, um mês e treze dias para bandeira amarela e vinte e dois anos, onze meses e quatro dias para bandeira vermelha.

Os resultados dos fluxos de caixa calculados usando microcontroladores com malha aberta demonstram que o tempo de retorno do investimento, considerando o *payback* descontado, do painel fixo em relação ao móvel é em média 13 anos menor, o valor presente líquido e TIR são aproximadamente R\$ 3.334,03 e 3,0% maiores que os apresentados pelo seguidor solar em malha aberta usando microcontroladores.

Tabela 5.18 - Fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando o painel fixo e painel móvel em malha fechada (Microcontrolador)

| Bandeira / itens | VPL Fixo | TIR Fixo | VPL Malha fechada | TIR Malha fechada | Tempo | Payback Simples Fixo | Payback Descontado Fixo | Payback Simples Malha fechada | Payback Descontado Malha fechada |
|-------------------|--------------|----------|-------------------|-------------------|-------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Bandeira verde | R\$ 5.561,57 | 10,94% | R\$ 2.888,79 | 8,36% | anos | 9 | 14 | 8 | 25 |
| | | | | | meses | 1 | 11 | 2 | 12 |
| | | | | | dias | 21 | 20 | 15 | 15 |
| Bandeira amarela | R\$ 6.469,89 | 11,59% | R\$ 3.900,29 | 8,86% | anos | 8 | 13 | 7 | 22 |
| | | | | | meses | 7 | 6 | 8 | 6 |
| | | | | | dias | 15 | 9 | 28 | 24 |
| Bandeira vermelha | R\$ 7.560,01 | 12,38% | R\$ 5.114,26 | 9,46% | anos | 8 | 12 | 7 | 19 |
| | | | | | meses | 0 | 2 | 3 | 6 |
| | | | | | dias | 28 | 9 | 1 | 1 |

Fonte: Autor

Conforme observado na Tabela 5.18, os valores de VPL e da TIR utilizando sistemas microcontrolados com seguidor solar em malha fechada apresentam valores positivos e indicam que a soma dos recebimentos descontados, considerando a TMA em 6,87% para a data inicial do projeto, supera ou iguala os desembolsos, igualmente descontados, (à mesma taxa), o que torna o projeto aceitável. Ainda percebe-se que a recuperação do investimento ocorre, considerando o *payback* descontado, aos vinte e cinco anos, doze meses e quinze dias para bandeira verde, vinte e dois anos, seis meses e vinte e quatro dias para bandeira amarela e dezenove anos, seis meses e um dia para bandeira vermelha.

Os resultados dos fluxos de caixa calculados usando microcontrolador com malha fechada demonstram que o tempo de retorno do investimento, considerando o *payback* descontado, do painel fixo em relação ao móvel é em média 9 anos menor, o valor presente líquido e TIR são aproximadamente R\$ 2.564,53 e 2,74% maiores que os apresentados pelo seguidor solar em malha fechada usando microcontroladores.

A fim de proporcionar a análise do uso do CLP em condições semelhantes ao uso de sistemas microcontrolados, foram utilizados os mesmos números de seguidores solar.

Para efetuar o controle de posicionamento angular dos seguidores solar foi simulada a aquisição de módulos digitais e analógicos. Portanto, a configuração mínima para atender os seguidores solar conta com uma CPU com 24 entradas e 16 saídas digitais, um módulo com 32 saídas digitais e dois módulos com 8 entradas analógicas. Dessa forma a configuração final seria 24 entradas e 48 saídas digitais e 16 entradas analógicas.

Considerando que os valores em malha fechada foram superiores ao sistema em malha aberta e que o investimento inicial quando utilizando o CLP é superior aos sistemas microcontrolados, optou-se em realizar a análise financeira do projeto do rastreador utilizando CLP, utilizando apenas o VPL, TIR e *payback* simples. Na Tabela 5.19 são apresentados os valores calculados de VPL, TIR e *payback* simples em malha aberta usando o CLP.

Tabela 5.19 - Fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, o painel fixo e painel móvel em malha aberta (CLP).

| Bandeira / itens | VPL Fixo | TIR Fixo | VPL Malha aberta | TIR Malha aberta | Tempo | <i>Payback</i> Simples Fixo | <i>Payback</i> Simples Malha aberta |
|-------------------|--------------|----------|------------------|------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Bandeira verde | R\$ 5.066,33 | 10,58% | - R\$ 10.177,19 | 4,12% | anos | 9 | 23 |
| | | | | | meses | 5 | 9 |
| | | | | | dias | 12 | 26 |
| Bandeira amarela | R\$ 5.945,02 | 11,21% | - R\$ 9.242,73 | 4,45% | anos | 8 | 22 |
| | | | | | meses | 11 | 5 |
| | | | | | dias | 0 | 22 |
| Bandeira vermelha | R\$ 6.999,59 | 11,97% | - R\$ 8.121,22 | 4,75% | anos | 8 | 21 |
| | | | | | meses | 4 | 0 |
| | | | | | dias | 6 | 18 |

Fonte: Autor

Conforme observado na Tabela 5.19, os valores de VPL e da TIR utilizando controlador lógico programável com seguidor solar em malha aberta apresentam valores de VPL negativos e TIR inferior a TMA em 6,87%, portanto, indicam que a soma dos recebimentos descontados para a data inicial do projeto, é inferior aos desembolsos, igualmente descontados, (à mesma taxa), o que torna o projeto rejeitado.

Outro aspecto relevante, considerando o *payback* descontado, utilizando o CLP em malha aberta é a recuperação do investimento que é superior a 254 anos para as tarifas com bandeiras verde, amarela e vermelha.

Os resultados dos fluxos de caixa calculados usando CLP com malha aberta demonstram que o tempo de retorno do investimento, considerando o *payback* simples, do painel fixo é em média 8 anos e o painel móvel em malha aberta é em média 22 anos, o valor presente líquido (considerando o prejuízo) e TIR do painel fixo são aproximadamente R\$ 15.184,03 e 6,81% maiores que os apresentados pelo seguidor solar em malha aberta usando CLP.

Na Tabela 5.19 são observados os fluxos de caixa calculados utilizando o controlador lógico programável em malha fechada.

Tabela 5.20 - Fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando a malha fechada usando CLP.

| Bandeira / itens | VPL Fixo | TIR Fixo | VPL Malha Fechada | TIR Malha Fechada | Tempo | Payback Simples Fixo | Payback Simples Malha Fechada |
|-------------------|--------------|----------|-------------------|-------------------|-------|----------------------|-------------------------------|
| Bandeira verde | R\$ 5.561,57 | 10,94% | R\$ - 8.961,21 | 4,53% | anos | 9 | 22 |
| | | | | | meses | 1 | 0 |
| | | | | | dias | 21 | 25 |
| Bandeira amarela | R\$ 6.469,89 | 11,59% | R\$ - 7.949,71 | 4,80% | anos | 8 | 20 |
| | | | | | meses | 7 | 9 |
| | | | | | dias | 15 | 26 |
| Bandeira vermelha | R\$ 7.560,01 | 12,38% | R\$ - 6.735,14 | 5,13% | anos | 8 | 19 |
| | | | | | meses | 0 | 6 |
| | | | | | dias | 28 | 1 |

Fonte: Autor

Conforme observado na Tabela 5.20, os valores de VPL e da TIR utilizando controlador lógico programável com seguidor solar em malha fechada apresentam valores de VPL negativos e TIR inferior a TMA em 6,87%, portanto, indicam que a soma dos recebimentos descontados para a data inicial do projeto, é inferior os desembolsos, igualmente descontados, (à mesma taxa), o que torna o projeto rejeitado. Assim como o sistema em malha aberta, a recuperação do investimento em malha fechada ocorre, considerando o *payback* descontado, num período superior a 254 anos para as tarifas com bandeiras verde, amarela e vermelha.

Os resultados dos fluxos de caixa calculados usando o painel móvel com o CLP demonstram que o tempo de retorno do investimento, considerando o *payback* simples, do painel fixo é em média 8 anos e o painel móvel em malha fechada é em média 20 anos. O valor presente líquido (considerando o prejuízo) e a TIR do painel fixo são aproximadamente R\$ 14.412,51 e 6,82% maiores que os apresentados pelo seguidor solar em malha fechada.

A utilização do CLP eleva os custos tendo em vista o grande número de entradas e saídas digitais exigidas, além das entradas analógicas e conforme Alves e Cagnon, (2010) e Alves (2008), o uso de controladores programáveis não são economicamente viáveis em sistema de pequeno porte.

Embora o *payback* simples não considere o tempo e custo do capital, alguns autores como Lima *et al* (2013), Livoti (2009) e Awomewe e Ogundele (2008), o recomendam como método inicial ou complementar, pois é um método de avaliação fácil de ser aplicado e apresenta um resultado de fácil interpretação. A fim de permitir a avaliação com a taxa de desconto apresentada, optou-se em aumentar o valor do fluxo de caixa através do incremento do número de painéis fotovoltaicos. Assim, para obter o VPL positivo e a TIR maior que a taxa de atratividade no menor fluxo de caixa (bandeira verde) para os sistemas móvel em malha aberta (546,70 Wh/dia) e móvel em malha fechada (591,77 Wh/dia) utilizando o CLP são necessários no mínimo 24 e 20 painéis, respectivamente. No entanto, o tempo de *payback* é superior a 69 anos em ambos os casos, assim para ter um *payback* aproximado ao sistema utilizando microcontrolador faz-se necessário a utilização de 33 painéis em malha aberta e fechada. Na Tabela 5.21 é comparado o VPL, TIR e *payback* descontado do sistema móvel em malha aberta utilizando o microcontrolador e CLP e na Tabela 5.22 é comparado o VPL, TIR e *payback* descontado do sistema móvel em malha fechada utilizando o microcontrolador e CLP.

Tabela 5.21 - Fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando a malha aberta usando microcontrolador e CLP.

| Bandeira / itens | VPL Microcontrolador | TIR Microcontrolador | VPL CLP | TIR CLP | Tempo | <i>Payback</i> Descontado Microcontrolador | <i>Payback</i> Descontado CLP |
|-------------------|----------------------|----------------------|-----------|---------|-------|--|-------------------------------|
| Bandeira verde | R\$ 1.672,81 | 7,76% | R\$ | 7,77% | anos | 32 | 32 |
| | | | 6.188,74 | | meses | 7 | 5 |
| | | | | | dias | 19 | 4 |
| Bandeira amarela | R\$ 2.607,27 | 8,23% | R\$ | 8,24% | anos | 27 | 27 |
| | | | 9.615,12 | | meses | 1 | 0 |
| | | | | | dias | 13 | 13 |
| Bandeira vermelha | R\$ 3.728,78 | 8,78% | R\$ | 8,79% | anos | 22 | 22 |
| | | | 13.727,33 | | meses | 11 | 10 |
| | | | | | dias | 4 | 14 |

Fonte: Autor

Tabela 5.22 - Fluxos de caixa calculados para as tarifas verde, amarela e vermelha, considerando a malha fechada usando microcontrolador e CLP.

| Bandeira / itens | VPL Microcontrolador | TIR Microcontrolador | VPL CLP | TIR CLP | Tempo | <i>Payback</i> Descontado Microcontrolador | <i>Payback</i> Descontado CLP |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|-------|--|-------------------------------------|
| Bandeira verde | R\$ 2.888,79 | 8,36% | R\$ | 8,37% | anos | 25 | 25 |
| | | | 10.647,34 | | meses | 12 | 11 |
| | | | | | dias | 15 | 19 |
| Bandeira amarela | R\$ 3.900,29 | 8,86% | R\$ | 8,87% | anos | 22 | 22 |
| | | | 14.356,18 | | meses | 6 | 5 |
| | | | | | dias | 24 | 4 |
| Bandeira vermelha | R\$ 5.114,26 | 9,46% | R\$ | 9,47% | anos | 19 | 19 |
| | | | 18.807,40 | | meses | 6 | 6 |
| | | | | | dias | 1 | 16 |

Fonte: Autor

Observa-se que os dados contidos na Tabela 5.21 e Tabela 5.22 apresentam significativos acréscimos nos valores de VPL dos sistemas com CLP em relação aos sistemas com microcontroladores, fato explicado devido ao aumento dos valores dos fluxos de caixas ocasionados pelo incremento de painéis FV. Entretanto, nota-se que os tempos de *payback* descontado e TIR são aproximados quando utilizados os sistemas microcontrolados com 9 painéis e sistemas com CLP utilizando 33 painéis.

Considerando a utilização de 9 painéis FV, na Tabela 5.23 é comparada a média dos valores de VPL, TIR e *payback* descontado das bandeiras tarifárias verde, amarela e vermelha para os sistemas fixo, móvel em malha aberta utilizando microcontrolador e CLP. Na Tabela 5.24 é comparada à média dos valores de VPL, TIR e *payback* descontado das bandeiras tarifárias verde, amarela e vermelha para os sistemas fixo, móvel em malha fechada utilizando microcontrolador e CLP.

Tabela 5.23 - Fluxos de caixa calculados para as médias das tarifas verde, amarela e vermelha, considerando 9 painéis FV pra os sistemas fixo, móvel em malha aberta com microcontrolador e CLP.

| Bandeira / itens | VPL | TIR | Tempo | <i>Payback</i> Descontado |
|----------------------------------|---------------|--------|-------|------------------------------|
| Fixo | R\$ 6.003,65 | 11,25% | anos | 14 |
| Malha aberta Microcontrolador | R\$ 2.669,62 | 8,26% | anos | 27 |
| Malha aberta CLP | -R\$ 9.180,38 | 4,44% | anos | 254 |

Fonte: Autor

Tabela 5.24 - Fluxos de caixa calculados para as médias das tarifas verde, amarela e vermelha, considerando 9 painéis FV pra os sistemas fixo, móvel em malha fechada com microcontrolador e CLP.

| Bandeira / itens | VPL | TIR | Tempo | Payback Descontado |
|-----------------------------------|---------------|--------|-------|--------------------|
| Fixo | R\$ 6.532,31 | 11,64% | anos | 13 |
| Malha fechada Microcontrolador | R\$ 3.967,78 | 8,89% | anos | 22 |
| Malha fechada CLP | -R\$ 7.882,02 | 4,82% | anos | 254 |

Fonte: Autor

Considerando que os valores médios globais são o somatório independente das médias dos valores de VPL, TIR e *payback* descontado do sistema painel fixo, painel móvel com microcontrolador e painel móvel com CLP. Assim, os valores médios globais de VPL, TIR e *payback* com a utilização de painel fixo são R\$ 6.267,98, 11,45% e aproximadamente 13 anos, respectivamente. Para o painel móvel em ambas as malhas (aberta e fechada) com controle de posicionamento angular controlado hipoteticamente por microcontrolador R\$ 3.318,70, 8,58% e aproximadamente 25 anos, respectivamente. Para o painel móvel em ambas as malhas (aberta e fechada) com controle de posicionamento angular através de controlador lógico programável -R\$ 8.531,20, 4,63% e acima de 254 anos, respectivamente.

Considerando a utilização de 33 painéis FV, o suficiente para tornar o projeto financeiramente viável, na tabela 5.25 observa-se a média dos valores de VPL, TIR e *payback* descontado para o painel fixo, móvel em malha aberta e móvel em malha fechada com controle de posicionamento angular através de controlador lógico programável.

Tabela 5.25- Fluxos de caixa calculados para as médias das tarifas verde, amarela e vermelha, considerando 33 painéis FV para os sistemas fixo, móvel em malha fechada com microcontrolador e CLP.

| Bandeira / itens | VPL | TIR | Tempo | Payback Descontado |
|----------------------|---------------|-------|-------|--------------------|
| Fixo | R\$ 2.669,62 | 8,26% | anos | 27 |
| Malha aberta CLP | R\$ 9.843,73 | 8,27% | anos | 27 |
| Fixo | R\$ 3.967,78 | 8,89% | anos | 22 |
| Malha fechada CLP | R\$ 14.603,64 | 8,9% | anos | 22 |

Fonte: Autor

Assim, os valores globais médios de VPL, TIR e *payback* com a utilização de painel fixo são R\$ 3.318,70, 8,58% e aproximadamente 24 anos e para o painel móvel em

ambas as malhas (aberta e fechada) com controle de posicionamento angular através de controlador lógico programável são R\$ 12.223,69, 8,59% e aproximadamente 24 anos, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

A presente dissertação descreve um estudo de viabilidade energética e financeira da implantação de um seguidor solar de um eixo para a produção descentralizada de eletricidade de um módulo FV.

Com o seguidor solar para o módulo FV instalado no LEA – UFC foi possível avaliar o comportamento e estabilidade mecânica da estrutura e o ganho de geração de energia elétrica do painel móvel em relação ao painel fixo, com intervalos de atualização da posição angular de 15, 30, 60 e 180 minutos, em malha aberta e fechada, com aplicação de uma carga fixa.

A média de irradiação diária, medida no LEA-UFC, para os meses de Abril, Maio, Junho e Julho de 2015 foi 4,98 kWh/m² e a média das irradiações medidas nos dias típicos utilizados em malhas aberta e fechada foi de 5,37 kWh/m². A irradiação média diária em março foi de 4,37 kWh/m², por tratar-se do período da quadra chuvosa em Fortaleza. Devido à ocorrência de chuvas, este mês constitui importante cenário para avaliar o potencial do seguidor solar, sendo estabelecido assim como o dia típico do mês o menor valor de irradiação medido (3,63 kWh/m²). Para março, a geração de energia elétrica diária do módulo FV com o sistema em malha fechada com seguidor solar e fixo foi de 255,93 Wh/dia e 217,45 Wh/dia, respectivamente. Portanto, a geração bruta do painel móvel foi superior à do fixo em 17,69%.

Os ganhos brutos de geração de energia elétrica foram calculados com os dados coletados dos meses de Abril a Junho de 2015. Comparando com a geração líquida, diferença entre a energia elétrica gerada bruta e a energia elétrica consumida pelo sistema com painel móvel, os resultados indicam ganhos de aproximadamente 5% comparando o sistema fixo com o móvel em malha fechada e 4% para o sistema fixo com o móvel com malha aberta, ambos com correção angular a cada cinco minutos.

Considerando os meses de forma independentes, o sistema com painel móvel em malha aberta e fechada apresentaram ganhos líquidos máximos de 6,3% e 11,3% em relação ao painel fixo, respectivamente. Entretanto, comparando apenas a energia elétrica bruta gerada, os valores obtidos com o sistema em malha fechada com seguidor solar e fixo em junho foram 677,15 Wh/dia e 531,40 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho bruto do painel móvel é superior ao fixo em 27,42%. Os resultados indicam ainda que a atualização da posição angular a cada 60 minutos teve o melhor rendimento; porém, por tratar-se de um

estudo que envolve situações com incertezas climáticas, pressupõe-se que o ganho e intervalo de atualização da posição angular do painel móvel possam sofrer alterações.

Apesar da energia elétrica bruta gerada do painel móvel em malha fechada nos meses de março e maio ser superior à energia elétrica gerada do painel fixo (255,93 Wh/dia e 217,45 Wh/dia e 622,59 Wh/dia e 546,10 Wh/dia), as energias líquidas apresentaram os ganhos negativos de -20,2% e -1,3%, respectivamente em relação ao painel fixo. Os ganhos negativos devem-se à energia elétrica consumida, ocasionados pelos doze posicionamentos angulares e 132 posicionamentos de correção angular do erro, estabelecido como pior cenário. Adicionalmente, março e maio apresentam baixa irradiação nos períodos iniciais da manhã e fins de tarde, onde ocorrem as vantagens da captação de energia solar dos painéis com seguidores.

Os resultados demonstram que para atender à demanda das cargas elétricas adotadas na situação hipotética são necessários 9 painéis de 87 Wp. Assim, o tempo médio de *payback* descontado calculado utilizando painéis fixos com uso de microcontrolador foi aproximadamente 13 anos.

Foi observado que no controle de posicionamento angular utilizando CLP em malha aberta os valores em média de VPL são negativos (- R\$ 9.180,38) e a TIR inferior à taxa de desconto adotada (4,44%) no estudo. Isso gera um elevado tempo de *payback* descontado (superior a 250 anos), sendo, portanto, uma situação no qual o projeto torna-se financeiramente inviável.

O tempo médio de *payback* descontado dos sistemas de controle de posicionamento angular com ambas as malhas (aberta e fechada) com uso de microcontrolador foi de aproximadamente 25 anos.

Para tornar o projeto aceitável com a utilização do controlador lógico programável foram utilizados 33 painéis FV. Dessa forma, os valores médios de VPL, TIR e *payback* descontados calculados com a utilização de painéis fixos foram R\$ 3.318,70, 8,58% e aproximadamente 24 anos, respectivamente. Para os painéis móveis em ambas as malhas (aberta e fechada) com controle de posicionamento angular controlado através de controlador lógico programável os valores médios de VPL, TIR e *payback* descontados calculados foram respectivamente, R\$ 12.223,69, 8,59% e aproximadamente 24 anos, respectivamente.

Sob o ponto de vista do melhor aproveitamento da energia solar, os resultados apresentados demonstram a maior capacidade de geração elétrica do sistema móvel em relação ao fixo. Entretanto, a implementação móvel proposta apresenta-se mais complexa. Embora tenha sido constatado um ganho de geração do painel móvel em relação ao painel

fixo em 75% dos ensaios realizados, o tempo de *payback* descontado das malhas é superior ao tempo de vida útil dos componentes. Assim, no caso de uso de uma das malhas de controle em projetos, faz-se necessário aprofundar a análise dos custos de investimentos, com a proposição de alternativas do ponto de vista financeiro.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista os resultados do seguidor solar, com ganhos do painel móvel em relação ao painel fixo e com a análise do desempenho técnico e financeiro da planta de geração de eletricidade através de painéis FV do LEA, como continuação das pesquisas realizadas nesta dissertação são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- a) Utilizar outros métodos e algoritmos de controle para o posicionamento angular do painel móvel, como por exemplo PID;
- b) Substituir o sensor de realimentação da posição angular (potenciômetro por encoder);
- c) Substituir o sistema de transmissão (correias, polias e engrenagens por coroa e sem-fim);
- d) Aumentar a potência do painel FV, assim como o número de painéis para validar a situação hipotética apresentada;
- e) Realizar a análise dos sistemas implementados ao longo de um ano para cada configuração de posicionamento angular;
- f) Diminuir o tempo da condição de funcionamento de 6h as 18h.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10899: Energia solar fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2013. 6 p.
- ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. UNESP - Campus Botucatu, 152 p, 2008.
- AMÉRICA DO SOL. **Projeto 50 telhados**. Disponível em: <
<http://www.americadosol.org/50telhados/>> Acesso em: 16 mar. 2015a.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. Ed. Brasília, DF, 2005. 243 p. ISBN 85-87491-09-1.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. Ed. Brasília, DF, 2008. 236 p. ISBN 978-85-87491-10-7.
- ANEEL. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=12&fase=3>>
. Acesso em: 23 mar. 2015.
- AMÉRICA DO SOL. **Maracanã Solar**. Disponível em: <
<http://www.americadosol.org/maracana-solar/>> Acesso em: 16 mar. 2015b.
- ASSAF NETO, Alexandre. **Finanças Corporativas e valor**. São Paulo: Atlas, 2003.
- BARKER, L.; NEBER, M.; LEE H. Design of a low-profile two-axis solar tracker. **Solar Energy**. n. 97. p. 569-576. 3 Out. 2013.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa n° 482, de 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Issn 1677-7042. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 11 fev. 2014. Seção 1, p 53. Disponível em: www.in.gov.br/autenticidade.html , pelo código 00012012041900053.
- BRASIL SOLAIR. **Potencial solar e eólico**. 2013. Disponível em: <
<http://www.brasilsolair.com.br/potencial-solar-e-eolico>>. Acesso em 10 Ago. 2014.
- BRAUN-GRABOLLE, P. **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana**. 2010. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em
<<http://www.fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/teses%20de%20doutorado/a-integracao-de-sistemas-solares-fotovoltaicos-em-larga-escala-no-sistema-eletrico-de-distribuicao-urbana-2010-priscila-braun.pdf>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2015.
- CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte, 2012. 369 p. ISBN: 978-85-87-929-51-8.

CORTEZ, R. J. M. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica**. 2013. 76 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores)-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

DIARIO DE PERNAMBUCO. **Usina Solar que abastece Arena Pernambuco aberta para visitaçã**o. 2014. Disponível em: < http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/vida-urbana/2014/05/27/interna_vidaurbana,506559/usina-solar-que-abastece-arena-pernambuco-aberta-para-visitacao.shtml>. Acesso em 16 mar. 2015.

ELETROBRÁS.**Relatório Anual da Administração 2010**. Florianópolis, 18 abr. 2011. 168 p.

ELIPSE. **HMI/SCADA Software Tutorial**. . Porto Alegre: Elipse Software Ltda, 2008.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014 -ano base 2013**. Rio de Janeiro, 2014. 212 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>> . Acesso em 20 Abr. 2015.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2015. 62p.

EPIA – European Photovoltaic Industry Association. **Global market outlook for photovoltaics 2014-2018**. Belgium, 2014. ISBN 9789082228403

GECKO. **Motor de Passo Modelo 4034-326-T**. Disponível em: <<http://www.geckobrasil.com.br/motor-de-passo/4034-346t.html>>. Acesso em: 7 ago. 2013.

GOMEZ-GIL, F. J.; WANG, X.; BARNETT, A. Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 16. p. 306-313, 15 set. 2011

GOOGLE. **Mapa de Fortaleza**. Disponível em: <<https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR>>. Acesso em: 7 ago. 2013.

GREENPEACE. **Há luz no fim do túnel**. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/Ha-luz-no-fim-do-tunel/>>. Acesso em: 26 ago. 2013.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica - manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. DGS, 2004. 368 p.

HUANG, B. J.; DING, W. L.; HUANG, Y. C. Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker. **Solar Energy**. n. 85. p. 1935–1944. 27 Maio 2011.

HUKSEFLUX. **CMP3 Pyranometer Sensor User Guide**. . Shepshed, Loughborough: Campbell Scientific Ltd, 2010.

IEA – International Energy Agency. **Key World Energy Statistics**. Paris, 2014. 82 p. Disponível em: <

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>>. Acesso em 20 Abr. 2015.

IMPrensa Oficial. **Governo do Estado de Minas Gerais. Usina solar do Mineirão é suficiente para abastecer mais de mil residências.** 02 jul. 2014. Disponível em: <<http://www.iof.mg.gov.br/index.php?/economia/economia/Usina-solar-do-Mineirao-e-suficiente-para-abastecer-mais-de-mil-residencias.html>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

INOVABOTS. **Ligação Unipolar em Motores de Passo.** Disponível em: <<http://inovabots.com/tutoriais/motores/motores-de-passo/ligacao-unipolar/>>. Acesso em: 7 ago. 2013.

JARDIM, C. S. **A Inserção da Geração Solar Fotovoltaica em Alimentadores Urbanos Enfocando a Redução do Pico de Demanda Diurno.** 2007. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PECV0497-T.pdf>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2015.

KYOCERA. **USER MANUAL LP02.** Holanda. Hukseflux Thermal Sensors, 2013.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.** 2. ed. Madri: Wiley: Instituto de Energia Solar, Universidade Politécnica de Madri, 2011. 1166 p.

MAIA, C. B.; FERREIRA, A. G.; HANRIOT, S. M. Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil. **Applied Thermal Engineering**, n. 73, p. 953-962. 2 set. 2014.

MAIA, F. Tauá, o recanto da energia solar. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, 10 abr. 2012. Disponível em <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/taua-o-recanto-da-energia-solar-1.373616>>. Acesso em: 08 nov. 2014.

MOHAMMAD, N.; KARIM, T. The Design and Implementation of Hybrid Automatic Solar Tracking System. **Research Science Press**. New Delhi, India. p. 25-39. 2012

MONTASSER, O. A. Development of a Smart Mechatronic Tracking System to Enhance Solar Cell Panels Performance. **International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)**. Vol. 4 | Iss.11| Nov. 2014. 2249–6645 MOREIRA, A. P. **Controle de Vazão de Biogás com Baixa Pressão para Produção Descentralizada de Eletricidade.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica). 155 f. 2011. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - Ceará - [S.l.]. 2011.

MOUSAZADEH, H. et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 13, p. 1800–1818, 20 jan 2009

NAZIAZENO, R. N. **Construção, Calibração e Análise de Desempenho de um Piranômetro de Baixo Custo, Baseado no Modelo Kimball-Hobbs.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). 77 f. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - Rio Grande do Norte. - Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2009.

OLIVEIRA, C. A. A. de. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado, em Tecnologias Energéticas e Nucleares)-Universidade Federal de Pernambuco-CTG, Recife, 2007.

PALM, III. J. W. **Introdução ao MATLAB para engenheiros**. 3. ed. Nova Iorque: AMGH, 2013. 557 p.

PAMPLONA, J. B.; GODOY, S. G. M. DE. O protocolo de kyoto e os países em desenvolvimento. **Pesquisa e Debate**, São Paulo, v. 18, n. 32, p. 329–353, 2007.

PENA, R. F. A. **Latitudes e Longitudes**. Disponível em: <
<http://www.mundoeducacao.com/geografia/latitudes-longitudes.htm>> Acesso em: 01 nov. 2015.

PEREIRA, RASOTO, A.; GNOATTO, A.A.; OLIVEIRA, A.G. de; ROSA, C.F. da; ISHIKAWA, G.; CARVALHO, H.A. de; LIMA, I.A. de; LIMA, J.D. de; TRENTIN; M.G.; RASOTO, V.I. **Gestão Financeira: enfoque em inovação**. 1. ed. Curitiba: Aymar, 2012. v. 6. 140p. (série UTFinova).

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; LASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos - Soluções energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2014. 530 p.

PINTO A.; MACAGNAN M.; ZILLES R.; LEHMANN J. Descrição de seguidores solares e sua aplicação em centrais fotovoltaicas conectadas à rede. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**, 3., 2010, Belém. São Paulo: USP, 2010.

REN21. **Renewables 2014 Global Status Report**. Paris, 2014. 216 p. ISBN 978-3-9815934-2-6

RUSTEMLI S.; DINCADAM F.; DEMIRTAS M. Performance comparison of the sun tracking system and fixed system in the application of heating and lighting. **The Arabian Journal for Science and Engineering**. Vol. 35. n. 2B. p. 171-183. Out. 2010.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos : o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. 114 p. ISBN 85-87583-04-2

RÜTHER, R. **Potencial da energia solar fotovoltaica no Brasil e projetos vitrine Estádios Solares e Aeroportos Solares**. Palestra apresentada no Seminário Mercosul Pós Copenhague. 19/03/2010.

SANTOS, A. H. M. et Al. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. 3. ed. Itajubá: FUPAI, 596 p, 2006.

SANTOS, I. P. dos. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. 2013. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em <http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_IsisPortolanDosSantos.pdf>. Acesso em: 02 de janeiro de 2015.

SECOM. SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL. **Pituaçu é o primeiro estádio da América Latina a operar com energia solar**. 10 abr. 2012. Disponível em: <<http://www.secom.ba.gov.br/2012/04/108542/Pituacu-e-o-primeiro-estadio-da-America-Latina-a-operar-com-energia-solar.html>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado, em engenharia mecânica e área de concentração em térmica e fluídos)-Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo-EESC/USP, São Carlos, 2012.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T., KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society - BAMS**, v. 90, n. 3, p. 311-323, Mar. 2009. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008BAMS2634.1>>. Acesso em 15 jun. 2014.

VÉRAS, P. C. **Estudo dos benefícios e proposta de um modelo de controle de um rastreador solar ativo**. 2004. 39 f. Monografia (graduação em Engenharia Mecânica, com habilitação em Controle e Automação) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 2004.

VIGNOLA, F.; STOFFEL, T.; MICHALSKY, J. **Solar and Infrared Radiation Measurements**. Nova Iorque: CRC Press, 2012. 408 p. ISBN: 978-1-4398-5190-6.

ZOMER, C. D. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações**. 2014. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em <<http://fotovoltaica.ufsc.br/Dissertacoes/Tese%20Doutorado%20Clarissa%20FINAL.pdf>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2015.

YAO, Y. et al. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. **Renewable Energy**. n. 72. p. 88-98. 16 jul. 2014.

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES GERADAS

Artigo em Congresso Nacional (Autor Principal):

BARBOSA, D. A.; CARVALHO, P. C. M.; MENEZES, R. J. A.; NETO, J. S. P.; MOREIRA, A. P.; NETO, M. R. B. "*Dispositivo de rastreamento solar para a geração descentralizada de eletricidade*", V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, abril de 2014.

Artigo em Congresso Nacional (Autor Principal):

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

**APÊNDICE B – TABELA DOS HORÁRIOS E VALORES ESTABELECIDOS PARA
O DESLOCAMENTO ANGULAR DO SEGUIDOR SOLAR.**

| Hora | Hexadecimal | Decimal | Posição (decimal) | Posição (angular) (graus) |
|-------|-------------|---------|----------------------|------------------------------|
| 6:00 | 600 | 1536 | 244 | -50 |
| 6:15 | 615 | 1557 | 241 | -47 |
| 6:30 | 630 | 1584 | 239 | -45 |
| 6:45 | 645 | 1605 | 237 | -43 |
| 7:00 | 700 | 1792 | 235 | -41 |
| 7:15 | 715 | 1813 | 233 | -39 |
| 7:30 | 730 | 1840 | 231 | -37 |
| 7:45 | 745 | 1861 | 229 | -35 |
| 8:00 | 800 | 2048 | 227 | -33 |
| 8:15 | 815 | 2069 | 225 | -31 |
| 8:30 | 830 | 2096 | 223 | -29 |
| 8:45 | 845 | 2117 | 221 | -27 |
| 9:00 | 900 | 2304 | 219 | -25 |
| 9:15 | 915 | 2325 | 217 | -22 |
| 9:30 | 930 | 2352 | 215 | -20 |
| 9:45 | 945 | 2373 | 213 | -18 |
| 10:00 | 1000 | 4096 | 211 | -16 |
| 10:15 | 1015 | 4117 | 209 | -14 |
| 10:30 | 1030 | 4144 | 207 | -12 |
| 10:45 | 1045 | 4165 | 205 | -10 |
| 11:00 | 1100 | 4352 | 203 | -8 |
| 11:15 | 1115 | 4373 | 201 | -6 |
| 11:30 | 1130 | 4400 | 199 | -4 |
| 11:45 | 1145 | 4421 | 197 | -2 |
| 12:00 | 1200 | 4608 | 195 | 0 |
| 12:15 | 1215 | 4629 | 192 | 2 |
| 12:30 | 1230 | 4656 | 190 | 4 |
| 12:45 | 1245 | 4677 | 188 | 6 |
| 13:00 | 1300 | 4864 | 186 | 8 |
| 13:25 | 1315 | 4885 | 184 | 10 |
| 13:30 | 1330 | 4912 | 182 | 12 |
| 13:45 | 1345 | 4933 | 180 | 14 |
| 14:00 | 1400 | 5120 | 178 | 16 |
| 14:15 | 1415 | 5141 | 176 | 18 |
| 14:30 | 1430 | 5168 | 174 | 20 |
| 14:45 | 1445 | 5189 | 172 | 22 |
| 15:00 | 1500 | 5376 | 170 | 25 |
| 15:15 | 1515 | 5397 | 168 | 27 |
| 15:30 | 1530 | 5424 | 166 | 29 |
| 15:45 | 1545 | 5445 | 164 | 31 |

| | | | | |
|-------|------|------|-----|----|
| 16:00 | 1600 | 5632 | 162 | 33 |
| 16:15 | 1615 | 5653 | 160 | 35 |
| 16:30 | 1630 | 5680 | 158 | 37 |
| 16:45 | 1645 | 5701 | 156 | 39 |
| 17:00 | 1700 | 5888 | 154 | 41 |
| 17:15 | 1715 | 5909 | 152 | 43 |
| 17:30 | 1730 | 5936 | 150 | 45 |
| 17:45 | 1745 | 5957 | 148 | 47 |
| 18:00 | 1800 | 6144 | 146 | 50 |