

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS**
CAMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Geovanni Henrique Rosa do Carmo

**Análise comparativa de um sistema de rastreamento
solar: Ganho na geração de energia e custos de
manutenção**

Divinópolis.

2019.

Geovanni Henrique Rosa do Carmo

**Análise comparativa de um sistema de rastreamento solar:
Ganho na geração de energia e custos de manutenção**

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica, Elétrica, Eletrônica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Henrique Gomes dos Santos.

Divinópolis.

2019.

RESUMO

Com o crescente aumento do consumo de energia elétrica em todo mundo com a intensificação do debate ambiental, é imprescindível que formas de geração de energia renováveis sejam cada vez mais utilizadas. O Brasil, por ser um país tropical e com luz solar em abundância durante todo o ano, tem na energia fotovoltaica uma importante alternativa no que diz respeito a geração de energia elétrica.

No entanto, esta forma de geração de energia normalmente não é aproveitada em seu potencial máximo, tendo em vista que para um aproveitamento ótimo da energia provinda do sol é necessário que os raios solares incidam de forma perpendicular à superfície do módulo fotovoltaico, o que, graças a movimentação relativa do sol é impossível, em uma instalação fotovoltaica fixa, durante todo o dia.

Uma solução para esta questão são os chamados rastreadores solares, estes, consistem em sistemas eletromecânicos que promovem a movimentação dos módulos fotovoltaicos de modo a deixá-los perpendiculares aos raios do sol durante todo o dia. Esse tipo de sistema costuma promover um aumento significativo na geração de energia. No entanto, além do sistema ter um custo de instalação elevado ele ainda aumenta os gastos com manutenção do sistema fotovoltaico.

Para encontrar o ganho monetário líquido obtido pelo aumento da eficiência na produção de energia elétrica gerado pelos rastreadores solares e se analisar a sua viabilidade econômica foi construído um sistema contendo quatro rastreadores solares. Em que cada um destes rastreadores é responsável pela movimentação de um módulo fotovoltaico.

A partir dos resultados relacionados aos ganhos obtidos com a utilização de rastreadores solares e das estimativas dos gastos de manutenção produzidos pelo sistema é possível concluir que os rastreadores, de fato aumentam a eficiência de uma instalação fotovoltaica, no entanto, como este tipo de sistema tem um alto custo para ser implementado e para ser mantido em funcionamento a sua utilização pode se tornar inviável financeiramente.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; Rastreador solar; Eficiência energética; Manutenção mecânica.

SUMÁRIO

1- Introdução.....	5
2-Fundamentação Teórica.....	10
3- Metodologia.....	29
4- Resultados e Discussões.....	48
5- Conclusões.....	56
6- Propostas para Trabalhos Futuros.....	57
7- Referências Bibliográficas.....	58
Anexo A: Software responsável pela movimentação dos módulos no decorrer do dia.....	59
Anexo B: Software responsável pela movimentação dos módulos no final do dia.....	60

1- INTRODUÇÃO

1.1- DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho teve por propósito construir e implementar uma estrutura contendo 4 rastreadores solares. Foi, então, estimado o ganho monetário obtido devido ao aumento do rendimento, na geração de energia, dos módulos fotovoltaicos graças a utilização dos rastreadores. Além disso, também foram estimados os custos de manutenção dos rastreadores solares. De posse desses dois dados pôde-se realizar uma análise do ganho líquido obtido a partir da utilização do sistema proposto e se efetuar uma análise com relação a sua viabilidade econômica.

1.2- MOTIVAÇÃO

O fornecimento crescente da energia elétrica é uma realidade do mundo contemporâneo, no Brasil, segundo a ONS, o crescimento médio anual da demanda de energia para os próximos 5 anos deverá ser de 3,9% a.a., evoluindo de 67.444 MW em 2018 para 78.700 MW em 2022. A sociedade moderna tem a energia elétrica como uma necessidade fundamental para o desenvolvimento de diversos ramos, como a agricultura, indústria e serviços, tornando indispensável o seu uso para o desenvolvimento das civilizações humanas [1]. Por outro lado, problemas ambientais como poluição do ar, aumento do efeito estufa e o aquecimento global são agravados pela utilização de formas de produção de energia não renováveis. Desta forma é importante atentar-se para diminuição na geração de energia provinda de fontes não renováveis e altamente prejudiciais ao ambiente, como petróleo, carvão mineral e gás natural [1]. De encontro a isso as fontes de energia limpa se tornam cada vez mais interessantes.

Dentre os diversos tipos de energia limpas, como a eólica e a provinda das ondas marítimas, a energia fotovoltaica é uma alternativa que deve ser considerada, no Brasil em especial ela pode ter um papel fundamental devido ao fato do país ser tropical e ter luz solar em abundância durante praticamente todo o ano.

No entanto a maior parte dos módulos geradores de energia fotovoltaica não têm todo o seu potencial empregado na transformação de energia solar em elétrica, isto se dá devido a variação na geração de energia ao longo do dia. Esta variação ocorre, pois, para um maior aproveitamento da energia solar é necessário que os raios solares incidam o mais perpendicularmente possível à superfície do módulo, o que não é possível, utilizando uma instalação fixa, devido a movimentação relativa do sol ao longo do dia. Para que os módulos de captação

de energia fotovoltaica permaneçam sempre perpendiculares aos raios solares, é imprescindível o uso de elementos que alterem a sua orientação, seguindo, assim, a movimentação relativa do sol [2].

No entanto, mesmo gerando uma maior quantidade de energia quando comparado com uma instalação fixa de mesmo porte, estruturas contendo estes elementos que alteram a orientação dos módulos fotovoltaicos no decorrer do dia ainda são pouco utilizadas. Isto se dá principalmente pelo elevado custo inicial para se implementar um sistema deste tipo e pelos custos de manutenção que são maiores quando comparado com os custos em uma instalação fixa.

1.3- OBJETIVO GERAL

Analisar o ganho monetário obtido a partir do aumento da geração de energia dado pela utilização de um sistema de rastreamento solar e comparar esse valor com o montante destinado a manutenção do sistema de rastreamento obtendo assim o lucro líquido, ou prejuízo gerado a partir da instalação de um sistema de rastreamento solar.

1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica sobre energia fotovoltaica;
- Revisão bibliográfica sobre rastreamento solar;
- Revisão bibliográfica sobre manutenção mecânica;
- Estudo da linguagem Python aplicada ao Raspberry Pi;
- Produção do texto do TCC 1;
- Finalizar a construção da estrutura mecânica do rastreador solar;
- Realizar a comunicação entre o Raspberry Pi e o sistema de acionamento dos motores;
- Efetuar a ligação elétrica do rastreador solar;
- Efetuar testes com o rastreador solar;
- Realizar a coleta de dados do sistema com e sem o uso do rastreamento solar;
- Efetuar a análise dos dados coletados;
- Produzir o texto do TCC 2;
- Apresentação do TCC 2;

1.5- ESTADO DA ARTE

A geração de energia fotovoltaica já está em voga a alguns anos, e métodos para aumentar a eficiência desta forma de se produzir energia elétrica estão sendo cada vez mais estudados. Nesse contexto trabalhos relacionados a rastreamento

solar e mais especificamente rastreamento solar por *software* estão a cada dia aperfeiçoando suas técnicas e, conseqüentemente, aumentando a eficiência desses sistemas ao mesmo tempo que diminuem os custos de produção e manutenção.

Trabalhos como “*New Design for Solar Panel Tracking System Based on Solar Calculations*”[1] de 2018 em que os autores criam, com uma nova abordagem, no desenvolvimento do rastreador. Nesta nova abordagem o rastreador é utilizado sem qualquer sensor para determinar a posição do sol. Com esse método os custos são reduzidos e a eficiência é a esperada para a região onde o estudo foi realizado.

Já o texto intitulado “*Simulation Model of Autonomous Solar Power Plant with Dual-Axis Solar Tracker*”[2] de 2018 fornece uma descrição de um modelo de simulação de uma estação de energia solar com um rastreador solar de eixo duplo automatizado, que foi desenvolvido usando o MATLAB / Simulink. O artigo apresenta os resultados da modelagem, que comprovam a eficácia da aplicação de módulos solares com um rastreador solar de eixo duplo em comparação com módulos localizados estaticamente. Além disso, com base na análise realizada do trabalho de modelagem da usina solar em MATLAB / Simulink, foram identificadas as melhores condições de operação de uma usina fotovoltaica.

Um outro artigo intitulado “*Sunflower Inspired Solar Tracking Strategy: A Sensorless Approach for Maximizing Photovoltaic Panel Energy Generation*”[3], de 2018 foi construído um rastreador que também não conta com sensores pois segundo o artigo, estes sensores são ineficazes sem a presença do sol e na forte ocorrência de luz refletida e são susceptíveis a erros de rastreamento devido a instalação incorreta e efeitos de condições climáticas variáveis. Desta forma a eficiência do módulo é reduzida. O esquema utiliza a corrente gerada pela luz do painel fotovoltaico trabalhando em conjunto com o módulo de relógio de tempo real para inferir a localização aparente do sol enquanto ele atravessa o céu durante o dia. O desempenho do protótipo sem sensor de eixo único foi avaliado em termos de erro de rastreamento e ganho de energia. O resultado do experimento realizado mostra que a estratégia proposta alcançou um erro médio de rastreamento de $0,727^\circ$ sob diferentes condições climáticas, enquanto sustentou uma perda de energia percentual média estimada de 0,287%. Isso maximiza a energia solar disponível recebida pelo painel fotovoltaico em 99,7%.

O Brasil também contribui com trabalhos nesta área, um exemplo é a dissertação intitulada “Desenvolvimento de um Sistema para Rastreamento Solar” [4] de 2018 que concluiu que é possível otimizar a captação energética por placas fotovoltaicas com sistema de rastreamento solar, obtendo eficiência energética de aproximadamente 60% superior aos painéis fixos convencionais. Esse incremento na eficiência energética do painel móvel de dois eixos é resultado do aumento do tempo de captação energética ao longo do dia, uma vez que tal painel apresentou alta captação solar desde o nascer até o pôr-do-sol.

Também no âmbito nacional a dissertação intitulada “Sistema de rastreamento solar automático baseado em algoritmo de posição solar aplicado a um refletor Fresnel linear” [5] de 2018, apresenta um modelo de automação de um rastreador solar que dispensa o uso de sensores para determinação da posição do Sol. Esta determinação é feita apenas com base em aspectos astronômicos, utilizando um algoritmo para cálculo, através do qual é possível prever a posição solar determinando os valores dos ângulos de azimute e de elevação solar através de dados de contagem de tempo, constantemente atualizados por um relógio aplicado às equações programadas.

1.6- ESCOPO DO TRABALHO

No Capítulo 2 são apresentadas a revisão de literatura e a fundamentação teórica do trabalho. Este Capítulo introduz conceitos sobre energia fotovoltaica, rastreamento solar e manutenção mecânica. Estes conceitos são necessários para o entendimento do restante do texto. Além disso o Capítulo também apresenta resultados de alguns estudos que demonstram o aumento do rendimento obtido a partir da utilização de rastreadores solares.

No Capítulo 3, denominado metodologia, é descrito como é feita a implementação do sistema, que foi utilizado na estrutura mecânica, como é feito o sistema elétrico, o sistema de acionamento dos motores, a movimentação dos módulos do sistema de controle e a parte de manutenção mecânica.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, nele são encontrados gráficos e dados que explicitam o rendimento do sistema, com e sem a utilização dos rastreadores solares. Em seguida são apresentados os custos para se efetuar

a manutenção do sistema e por fim o ganho monetário obtido a partir da utilização dos rastreadores foi comparando-se os custos de manutenção desta forma é possível obter o ganho líquido obtido a partir da utilização do sistema.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas pela implementação do sistema.

2 Fundamentação Teórica

2.1- Energia Fotovoltaica

A Figura 2.1 apresenta um mapa de irradiação solar, este compara, em termos de média anual de irradiação, Brasil e Europa. Analisando o mapa fica evidente que o Brasil tem um alto potencial de geração de energia fotovoltaica, superior inclusive ao encontrado no continente europeu. Todo este potencial, no entanto, não é aproveitado da melhor maneira, tendo em vista que a Europa possui instalados mais de 106GW de energia fotovoltaica enquanto o Brasil possui um pouco mais de 1GW instalado[6].

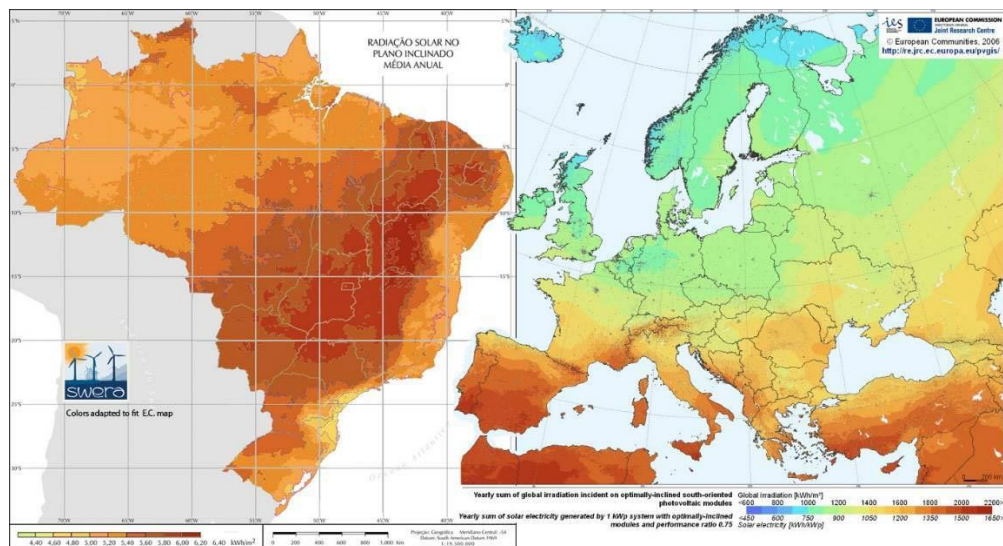


Figura 2.1: Mapa de irradiação[6]

Com o intuito de se ter um maior aproveitamento da energia provinda do sol o governo Brasileiro está propondo medidas que estimulam esta forma de geração de energia. Uma das medidas mais importantes é a resolução 482/2012 da ANEEL que regulariza microgeradores e minigeradores, com essa resolução consumidores comuns passam a poder possuir instalações geradoras de energia conectadas a rede e receber créditos relativos a energia excedente gerada[7]. Tais créditos podem ser utilizados para abater consumos futuros.

Em 2015 o Convênio nº 16 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) decidiu por isentar os estados participantes a realizarem cobrança do ICMS sobre a energia injetada na rede, o que corrige um desequilíbrio, pois

anteriormente a cobrança de ICMS era sobre o consumo bruto e não sobre o consumo líquido de energia, este deve ser calculado após o abatimento da energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

Outra medida interessante ocorreu em 2015 com a inclusão de equipamentos de energia fotovoltaica nos itens de financiamento Construcard da Caixa Econômica Federal. O incentivo permite que uma pessoa física adquira os equipamentos que podem ser quitados em até 240 meses com taxas de juros inferiores às do mercado[8].

Além disso com a resolução 678 da ANEEL em vigor é estimado pelo próprio órgão que até 2024 cerca de 1,2 milhões de geradores de energia solar serão instalados em todo o Brasil.[6] Há outras formas de fomento à energias alternativas, como a realização de leilões públicos e/ou aplicação de cotas compulsórias de aquisição de energia por parte das concessionárias do setor elétrico [7].

Por outro lado, a ABNT cria normas com relação aos inversores ongrid [4]. Para se projetar e normatizar instalações de geração de energia fotovoltaica é necessário um conhecimento técnico sobre o seu princípio de funcionamento

2.2 Princípio de Funcionamento

O efeito fotovoltaico, observado por Edmond Becquerel em 1839, consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de um semicondutor, quando esse absorve a luz visível[9]. A principal vantagem de se usar o efeito fotovoltaico para se gerar energia elétrica é ter os raios solares, que são gratuitos, ilimitados e não poluentes, como uma matéria prima. Outra grande vantagem da geração fotovoltaica é que, ao menos em instalações fixas, os custos de manutenção são baixos quando comparados com outras formas de geração como hidrelétrica ou termoelétrica.

A Figura 2.2 mostra uma usina solar, ou seja, um sistema fotovoltaico de grande porte que utiliza milhares de módulos fotovoltaicos para gerar energia elétrica. Esses módulos ocupam milhares de quilômetros quadrados de extensão e estas estruturas são construídas visando a produção e venda de energia elétrica.



Figura 2.2: Primeira usina fotovoltaica da CEMIG, localizada em Janaúba-MG.

Na usina fotovoltaica da CEMIG em Janaúba-MG os módulos fotovoltaicos são fixos. Neste tipo de instalação o ângulo de inclinação do módulo com relação a superfície da terra não varia, tão pouco o ângulo com relação ao norte geográfico. A maioria esmagadora das instalações fotovoltaicas no Brasil e no mundo são fixas, desta forma as normas brasileiras regulamentam apenas geradoras com instalações deste tipo, nenhuma norma brasileira atual contempla instalações com rastreamento solar, ou seja, onde os ângulos de inclinação à superfície da terra e o com relação ao norte geográfico do módulo fotovoltaico variam no decorrer do dia.

Os geradores fotovoltaicos, em instalações fixas, não exercem todo o seu potencial na geração de energia elétrica. Isto se dá devido a variação da irradiação solar ao longo do dia. Essa variação ocorre graças a movimentação relativa entre sol e a terra.

Para um maior aproveitamento da energia fotovoltaica é necessário que os raios solares incidam o mais perpendicularmente possível à superfície do módulo, o que não é possível, durante todo o dia, quando se está utilizando de módulos fotovoltaicos fixos.

2.3 Rastreamento Solar

A fim de se aumentar a eficiência na geração de energia são utilizadas estruturas eletromecânicas que variam a orientação dos módulos fotovoltaicos em direção ao sol. Desta forma os raios solares incidem perpendicularmente sobre os módulos durante todo o dia. Estas estruturas são denominadas por rastreadores solares ou seguidores solares. Com a utilização desses rastreadores é possível aumentar, de forma considerável, o rendimento na geração de energia elétrica quando comparado com a geração obtida em uma instalação fixa[10].

Existem diferentes tipos de classificação no que diz respeito a rastreadores solares: com relação à quantidade de eixos, se são ativos ou passivos e ao método de rastreamento solar. A Figura 2.3 apresenta um diagrama com essas subdivisões que são explicadas individualmente nos parágrafos seguintes.

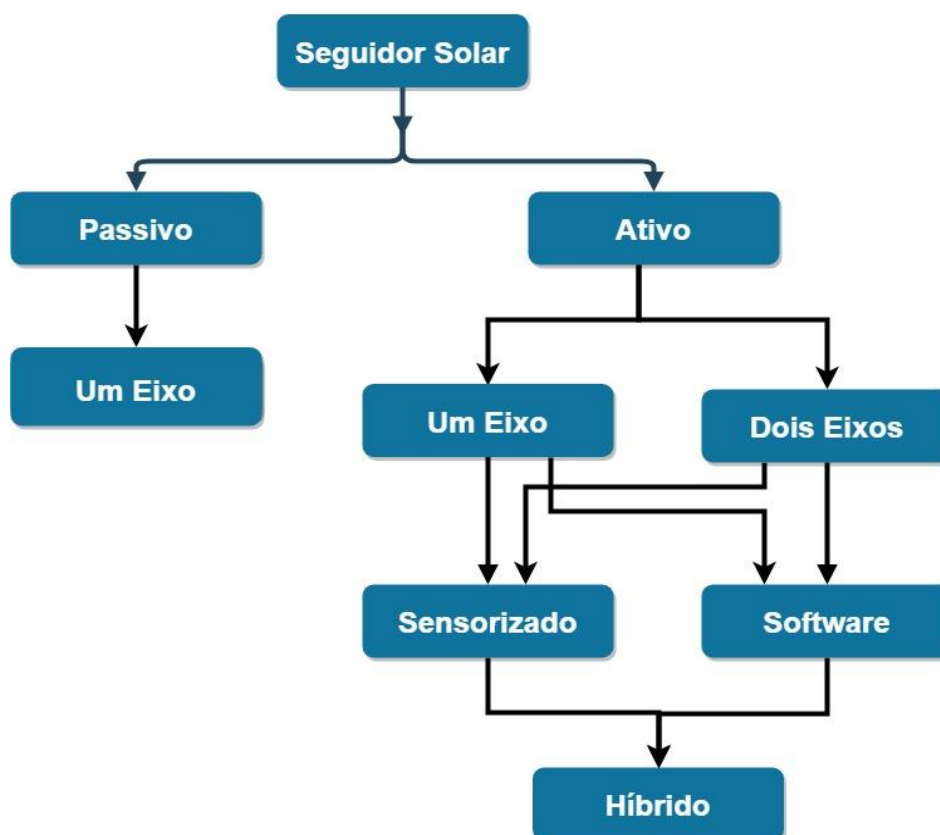


Figura 2.3: Tipos de rastreador solar.

Um rastreador solar pode ser classificado como ativo ou passivo. Na Figura 2.4 tem-se um rastreador passivo. Este tipo de rastreador é de fácil construção, baixo custo e de manutenção simplificada por não se utilizar de motores ou energia elétrica para efetuar a movimentação dos módulos. Tal movimentação acontece a partir do aquecimento de um fluido no duto inferior, o fluido então se movimenta até o duto superior através de aletas, o que acarreta na movimentação do rastreador.

Rastreadores passivos têm como principal desvantagem a sua alta sensibilidade a distúrbios causados pelo vento, tendo em vista que o seu eixo é livre, além disso em dias nublados a água não aquece o suficiente para possibilitar a movimentação dos módulos.

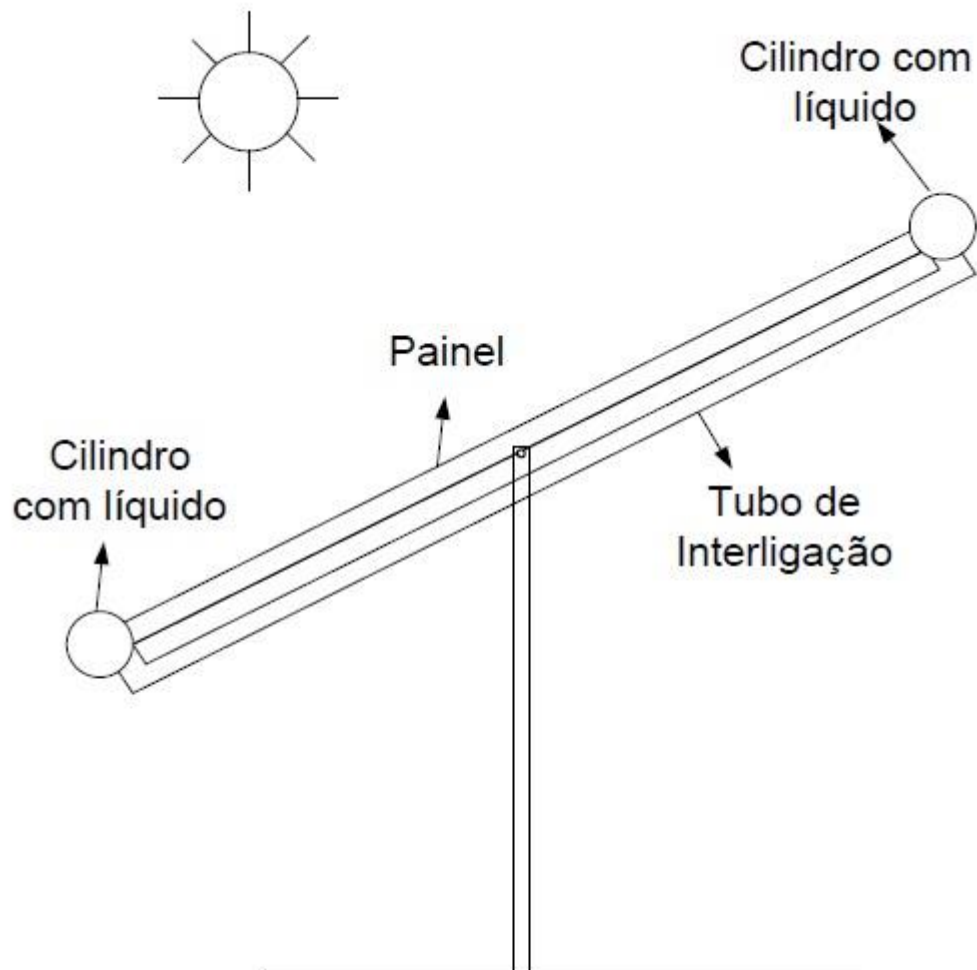


Figura 2.4: Sistema de rastreamento solar passivo.[11]

Já o rastreamento ativo tem como principal característica a movimentação dos módulos fotovoltaicos ser feita a partir da utilização de motores acoplados a conjuntos de engrenagens além de circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle da movimentação dos módulos. Rastreadores solares ativos podem ter um ou dois eixos.

Os dois eixos de rotação mais utilizados em rastreadores solares são mostrados na Figura 2.5. O primeiro deles faz o ajuste do azimute, este, no hemisfério sul, é a inclinação dos módulos fotovoltaicos em relação ao norte geográfico. Na região sudeste do Brasil a potência máxima do arranjo é obtida, em instalações fixas, com azimute 0° . O outro ajuste é feito no ângulo de inclinação dos módulos em relação ao solo, com essa inclinação igual a 22° se obtém, na região sudeste, a potência máxima do arranjo em instalações fixas[12].

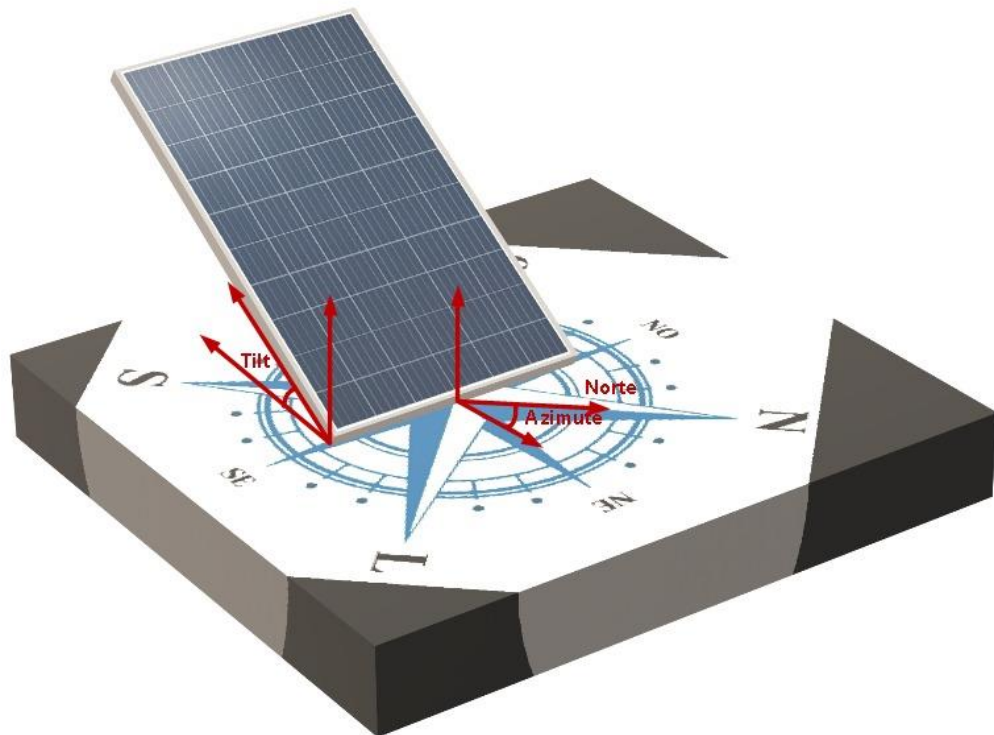


Figura 2.5: Ângulos de azimute e de inclinação.

A Figura 2.6 mostra uma representação de rastreadores com apenas um eixo, estes normalmente são azimutais, ou seja, vão corrigindo o ângulo de azimute no decorrer do dia e seu eixo móvel é vertical, percorrendo o seguimento no sentido Leste-Oeste, o eixo móvel do rastreador apresentado na Figura 2.6 é o eixo z. Essa variação no ângulo ao decorrer do dia é feita de forma gradual objetivando que a incidência dos

raios solares seja o mais perpendicular possível com relação a superfície dos módulos durante todo o dia.

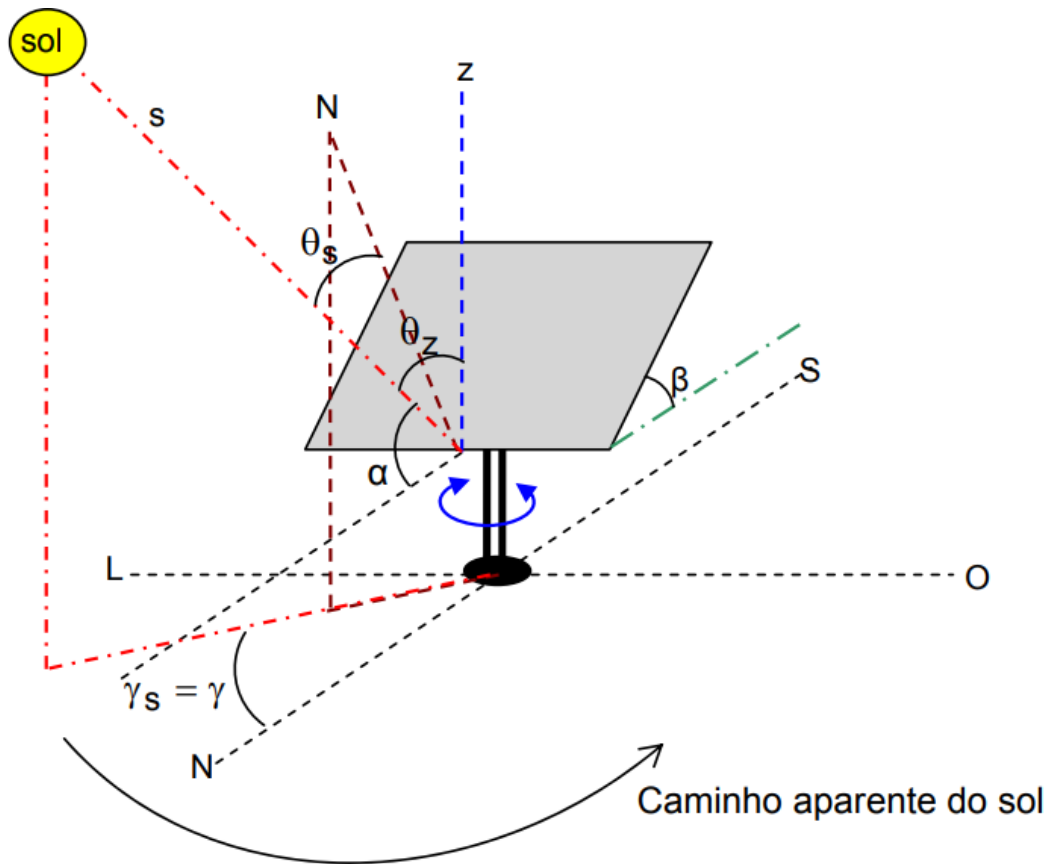


Figura 2.6: Representação de um rastreador azimutal.

Com o movimento no eixo horizontal, tem-se a correção constante da inclinação do módulo em relação ao Sol. O movimento em torno do eixo vertical faz a correção do azimute, com isso o azimute do módulo solar ficará igual ao azimute do sol.

Um exemplo de uma usina solar que utiliza rastreadores com um único eixo é a Central Solar de Serpa (Portugal), que pode ser vista na Figura 2.7, onde foram instalados 52.000 módulos fotovoltaicos, gerando 20 GWh de energia elétrica por ano [13].



Figura 2.7: Sistema de rastreamento solar com um eixo móvel.[13]

Já seguimentos em dois eixos, como o que pode ser visualizado na Figura 2.8, tem movimentação azimutal (eixo vertical) e de inclinação ou tilt (eixo horizontal) o que proporciona um maior rendimento dos módulos fotovoltaicos.

Rastreadores com dois eixos proporcionam uma maior eficiência na conversão de energia, pois este sistema possibilita um acompanhamento de toda a movimentação solar. No entanto é o sistema que apresenta um maior custo de produção e manutenção, pois necessita de dois atuadores para realização do seu rastreamento, além de apresentar uma maior complexidade mecânica.

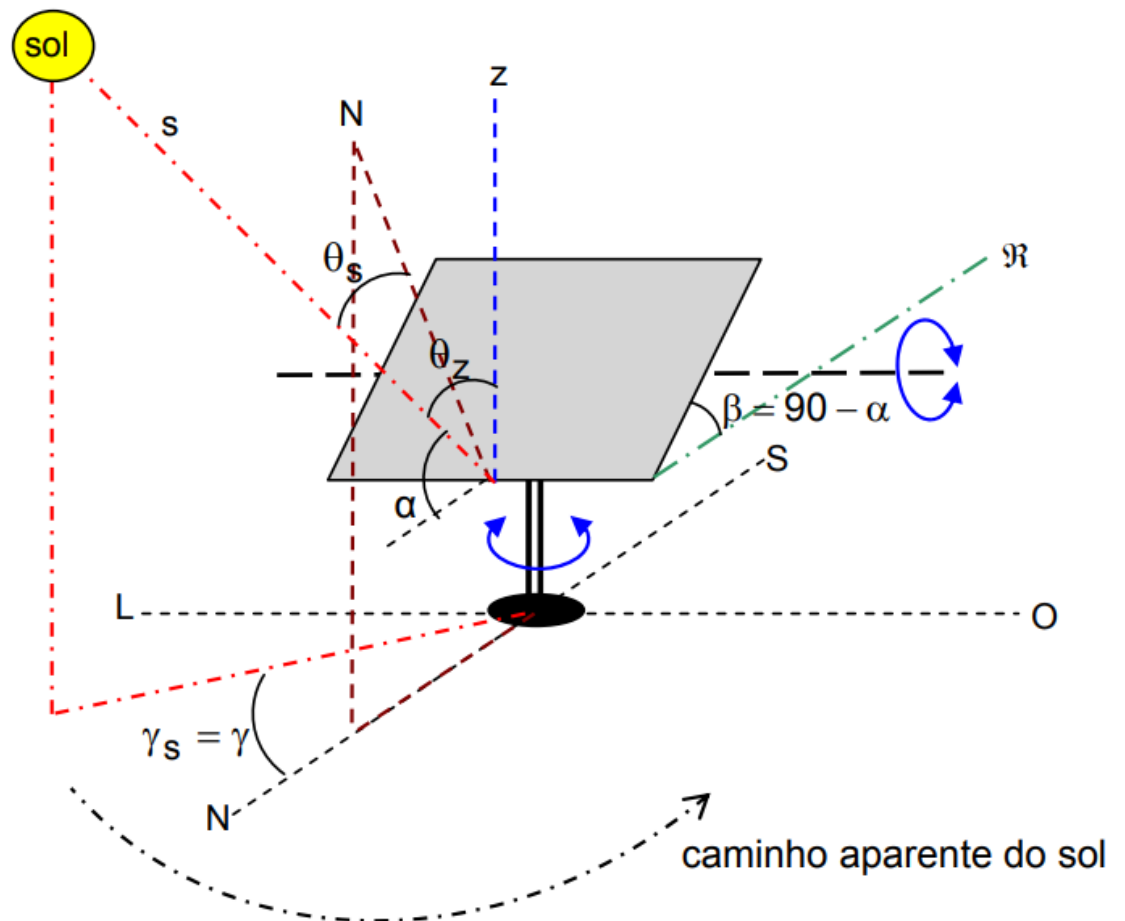


Figura 2.8: Rastreamento solar em 2 eixos

Outra subdivisão possível com relação a tipos de rastreadores ativos é feita quanto ao método de localização solar, que pode ser em malha fechada ou em malha aberta. O primeiro deles utiliza sensores de luminosidade para determinar, de forma direta, qual a posição do rastreador fará com que a incidência de raios solares seja a maior possível, a cada instante, nos módulos fotovoltaicos[11].

Existem diversos tipos de sensores capazes de fazer essa localização solar, um exemplo é o Piranômetro Fotovoltaico que é constituído por uma célula fotoelétrica de silício monocristalino, que produz uma corrente elétrica quando iluminada, esta corrente é proporcional à intensidade da radiação incidente[14].

Outra opção com o menor custo é a utilização de um resistor dependente de luz conhecido como LDR, este consiste em um resistor cuja resistência varia conforme a intensidade da luz que incide sobre ele. Normalmente a resistência é inversamente proporcional a intensidade da luz.

O rastreamento ativo em malha aberta, que foi utilizado neste trabalho, faz uso de dados de latitude e longitude do local de instalação e as coordenadas

solares além da hora solar para realizar a localização do sol. Esses dados são então obtidos pelo microcontrolador, microcomputador ou PLC que atuam na orientação dos motores deixando os módulos em um ângulo onde os raios solares incidam de forma perpendicular sobre eles. Essa orientação já é pré-programada para todas as mudanças do sol tanto no período diário como anual, desta forma localizadores por software podem ser utilizados em rastreadores com um ou dois eixos.

O principal benefício desse tipo de localizador é a possibilidade de utilização mesmo com o sol encoberto por nuvens, pois o painel continuará percorrendo seu trajeto automático.

A Figura 2.9 mostra o diagrama de blocos de um sistema de rastreamento em malha aberta, nele o bloco denominado “Dados” fornece os dados de localização da instalação e hora solar ao controlador, este de posse de todos esses dados determina a orientação dos módulos a partir do acionamento dos motores que estão contemplados no bloco denominado “Acionador”. Já o bloco denominado “Controlador” recebe os dados, efetua o seu processamento e com isso controla a movimentação dos motores. Os elementos do diagrama de blocos serão detalhados adiante no texto.

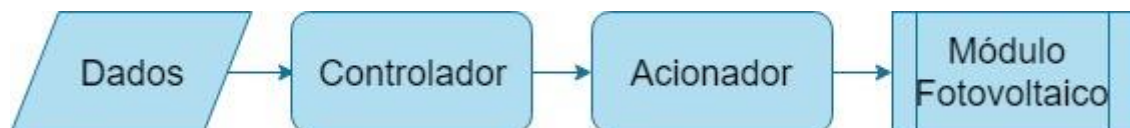


Figura 2.9: Diagrama de um rastreador solar em malha aberta.

Existe também a possibilidade de se utilizar um sistema híbrido que emprega sensores e software para efetuar a localização do sol.

2.4 Aumento do Ganho Gerado Pelo Rastreamento Solar.

Como já foi visto na seção anterior a principal vantagem da utilização de rastreadores solares é o aumento do ganho na geração de energia elétrica devido ao fato dos módulos estarem sempre posicionados em direção ao sol. Nesta seção é feita uma revisão de alguns trabalhos que utilizam rastreadores solares, com o intuito de se identificar, em termos quantitativos, essa melhoria de eficiência na geração de energia elétrica.

Em [11], como pode ser visto na Figura 2.10, chegou-se a um aumento de 26% na eficiência utilizando-se um rastreador de um eixo em comparação com uma instalação fixa além de um ganho na eficiência de 35% utilizando-se rastreador de dois eixos em comparação com a instalação fixa.

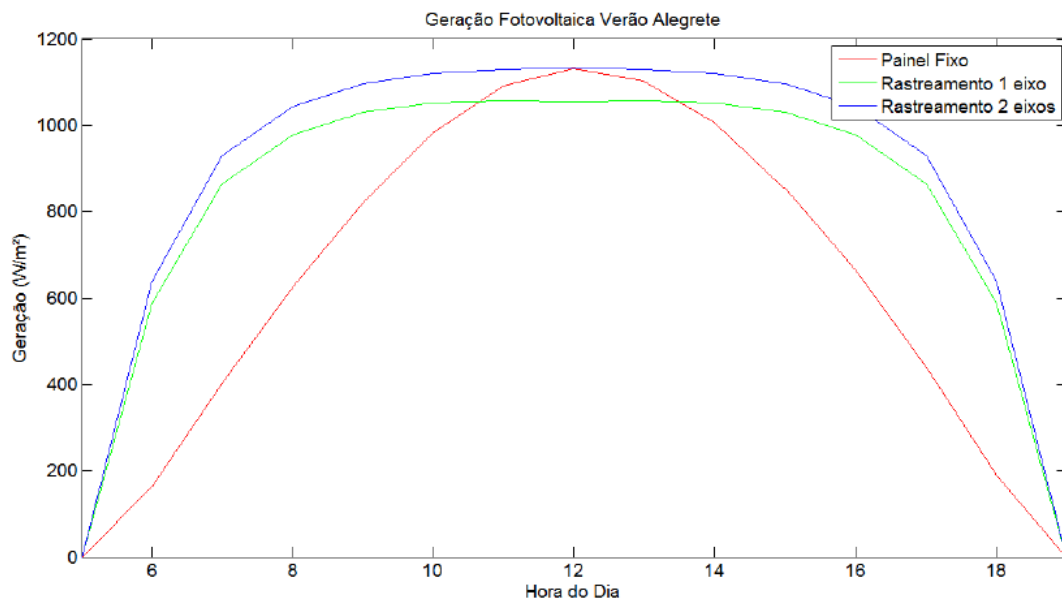


Figura 2.10: Comparação, em termos de geração energia fotovoltaica, entre sistemas com e sem rastreamento solar[11].

Já no sistema representado pela Figura 2.11, retirada do artigo [15] o ganho energético do sistema com rastreamento solar é 35% maior, quando comparado com uma instalação fixa.

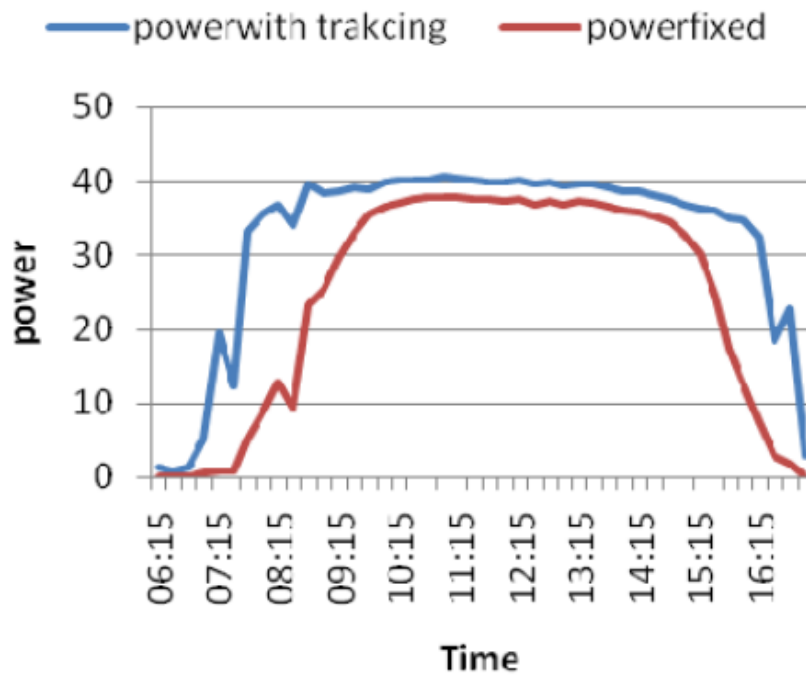


Figura 2.11: Comparação, em termos de geração energia fotovoltaica, entre sistemas com e sem rastreamento solar[15].

Em [16] como pode ser visto na Figura 2.12 é obtido um ganho de eficiência de 26.27% com a utilização de um rastreador que muda a posição dos módulos fotovoltaicos a cada 5 minutos. No gráfico, S1 mostra a potência gerada em uma instalação fixa e S2 mostra a potência gerada a partir de módulos com rastreamento solar.

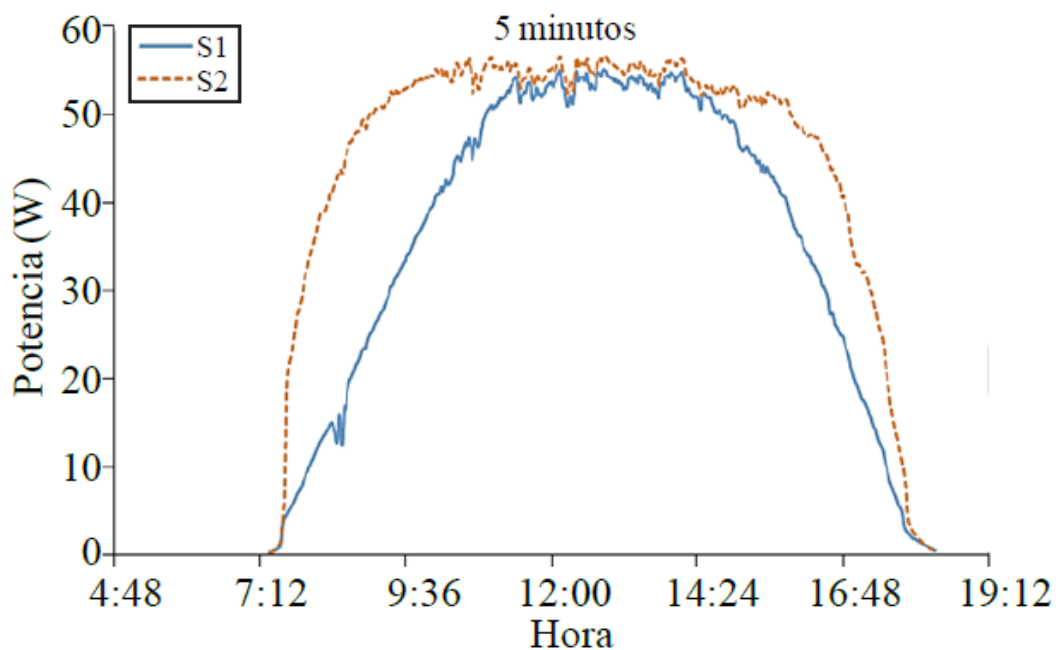


Figura 2.12: Comparação, em termos de geração energia fotovoltaica, entre sistemas com e sem rastreamento solar [16].

Em [17] como pode ser visto na Figura 2.13 é feita a comparação de energia gerada entre sistemas que utilizam rastreadores e instalações fixas. É notado que o uso de rastreadores com dois eixos de movimentação resulta em um aumento no total de eficiência diária de cerca de 41,34% em relação à de um sistema fixa.

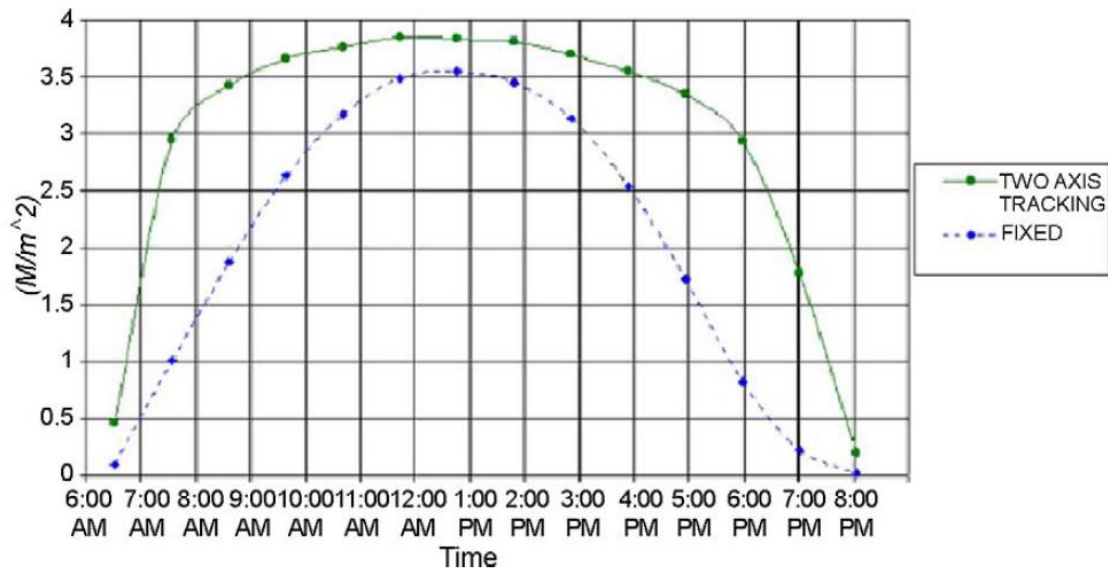


Figura 2.13: Comparação, em termos de geração energia fotovoltaica, entre sistemas com e sem rastreamento solar [17].

Em [10] é observado um aumento de 15 % na geração de energia do sistema com utilização dos rastreadores solares quando comparado com instalações fixas, esses resultados podem ser vistos na Figura 2.14, onde os valores no eixo horizontal estão em horas e do eixo vertical em KW.

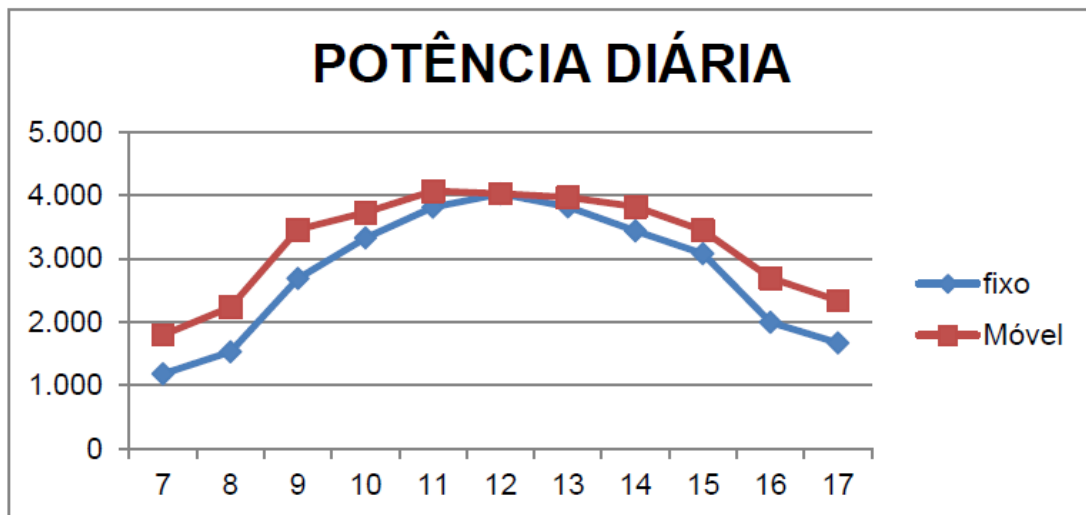


Figura 2.14: Comparação na energia solar em sistemas com e sem rastreamento solar[10].

Já em [18] os autores avaliam o desempenho de rastreadores em dias nublados e desfavoráveis à geração de energia como o representado pelo gráfico apresentado na Figura 2.15, chega a um ganho de aproximadamente 15% na eficiência do módulo fotovoltaico.

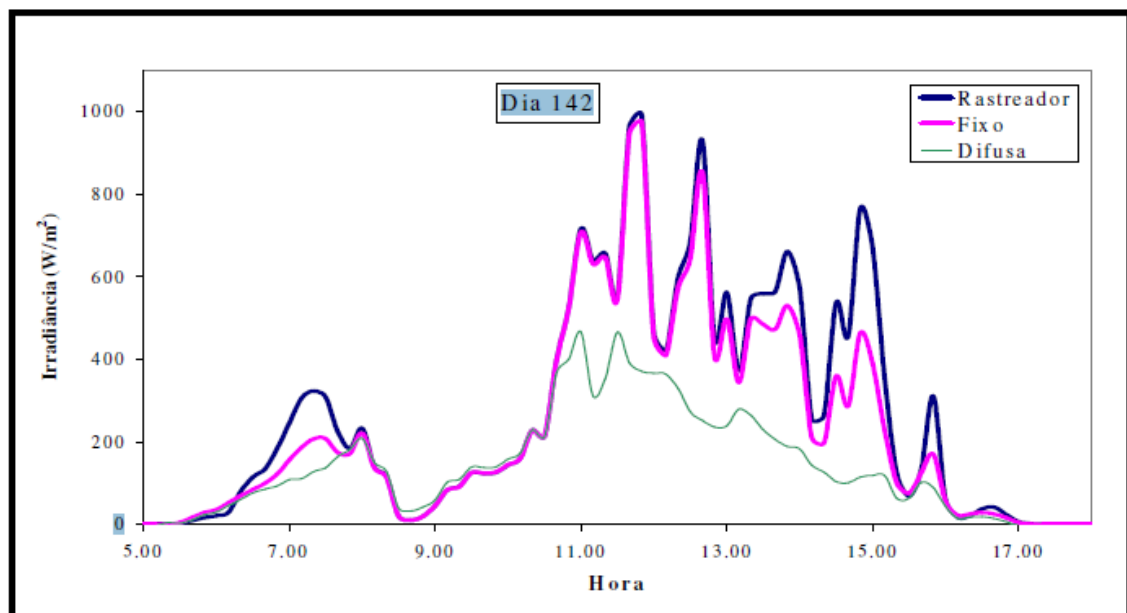


Figura 2.15: Irradiação solar em um dia nublado[18].

A partir destes dados pôde-se concluir que a utilização de sistemas de rastreamento solar, de fato, aumenta de forma considerável a eficiência na geração de energia. No entanto nos estudos acima citados não são considerados os gastos

com a manutenção dos rastreadores afim de se obter o ganho monetário real obtido a partir da utilização deste tipo de sistema. Na Figura 2.15 também é apresentada a curva devido a Radiação difusa que se trata da luz solar recebida indiretamente, resultante da ação da difração nas nuvens, nevoeiro, poeiras em suspensão e outros obstáculos na atmosfera.[18]

1.4: Manutenção dos Módulos

A manutenção é o conjunto de ações responsáveis por manter os mecanismos em funcionamento, essas ações envolvem a conservação, adequação, restauração, substituição e a prevenção. Sem um bom programa de manutenção os prejuízos causados por equipamentos com defeito são elevados devido a atrasos ou interrupções na produção, o que pode causar perda de mercado devido a insatisfação dos clientes.

A atividade de manutenção precisa ser eficiente e eficaz; ou seja, não basta apenas reparar o equipamento ou instalação tão rapidamente quanto possível. É preciso manter a função do equipamento disponível para a operação, evitar a falha do equipamento e reduzir os riscos de uma parada de produção não planejada.[19]

De forma geral a manutenção pode ser dividida em dois grandes grupos o que contempla as técnicas de manutenção programada e o que considera a manutenção não programada.

A manutenção não programada, também conhecida como corretiva é aquela em que é realizado um reparo ou substituição de alguma peça devido a ocorrência de alguma falha não prevista. Este tipo de manutenção é praticado somente depois que o equipamento ou a máquina esteja danificado. Não é recomendada a utilização de manutenção corretiva como principal estratégia de manutenção. A manutenção planejada, por sua vez, pode ser dividida em preventiva, preditiva e TPM (Manutenção Produtiva Total).

A manutenção preventiva consiste no conjunto de procedimentos e ações antecipadas que visam manter a máquina em funcionamento. Presume-se que o serviço de manutenção possa ser planejado em termos de número de horas de operação de máquina ou mesmo de um tempo total decorrido, em horas, ano, ciclos, quilometragem percorrida, capacidade produzida dentre outras. As principais vantagens desse tipo de manutenção são a menor ocorrência de quebras repentinas e o fato de as paradas serem planejadas. Por outro lado, podem ocorrer

trabalhos desnecessários e os defeitos ainda acontecem uma vez que o programa de manutenção, leva em consideração apenas as condições médias dos equipamentos da planta, baseado em histórico e/ou recomendação do fabricante.

Já a manutenção preditiva é um tipo de conservação preventiva baseada no conhecimento das condições de cada um dos componentes das máquinas e equipamentos. É usada para maximizar o uso da máquina, planejamento da manutenção é baseado tanto na produção quanto nas necessidades conhecidas de manutenção[20]. Testes e medições são feitos periodicamente para determinar a época adequada para substituições ou reparos, tempo de parada da planta pode ser programado economicamente, para atender as necessidades da produção. Desta forma os custos da manutenção são minimizados ao reduzir os eventos de manutenção desnecessários. No entanto este tipo de manutenção apresenta alto custo de operação, pois os instrumentos e aparelhos utilizados para medições e ensaios são sofisticados e caros[20].

A TPM (manutenção produtiva total) inclui programas de manutenção preditiva e preventiva. A manutenção produtiva total é baseada em cinco pilares básicos que aumentam a eficiência do equipamento, estabelecimento de um sistema de manutenção autônomo pelos operadores estabelecimento de um sistema planejado de manutenção.[21]

Nas últimas décadas, observou-se um aumento na demanda por produtos e sistemas de melhor desempenho a custos competitivos. Surgiu também a necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos (sejam elas falhas que simplesmente aumentam os custos associados aos produtos ou falhas que possam implicar riscos sérios à segurança), o que resultou numa ênfase crescente em sua confiabilidade. O conhecimento formal resultante da análise de falhas e da busca da minimização de sua ocorrência provê uma rica variedade de contextos nos quais surgem considerações acerca da confiabilidade.

Em seu sentido mais amplo, confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas. Em análises de engenharia, todavia, é necessária uma definição quantitativa de confiabilidade, em termos de probabilidade.

Confiabilidade é definida como uma probabilidade. Isso significa que todos os dados de confiabilidade devem apresentar valores entre 0 e 1 e que os axiomas clássicos da probabilidade podem ser aplicados em cálculos de confiabilidade. Para a correta especificação do modelo matemático que representa o desempenho de

um item, deve-se definir de maneira precisa o que se entende por seu desempenho adequado. O modelo matemático mais simples usado para representar a condição de um item é o modelo binário, segundo o qual um item pode estar em um estado de funcionamento (apresentando desempenho adequado) ou de falha. Em ensaios de confiabilidade realizados com produtos muito robustos, não é viável aguardar a falha dos itens em condições normais de utilização. Nesses casos, o melhor curso de ação é acelerar o teste impondo estresse aos itens[22].

Testes acelerados são utilizados com o intuito de encurtar a vida de produtos ou acelerar a degradação de suas características de desempenho. Tais testes têm como objetivo a obtenção de dados de confiabilidade em um menor período de tempo; uma vez modelados e analisados de forma adequada, esses dados poderão fornecer informações sobre a vida e desempenho do produto em condições normais de operação.[22] Testes acelerados são úteis em situações em que o produto a ser testado apresenta alta confiabilidade, demandando longos períodos de operação até a ocorrência de falhas em testes usuais de confiabilidade. Nesses casos, os testes de vida sob condições normais de operação tendem a ser economicamente inviáveis. Mesmo quando viáveis economicamente, tais testes podem demandar um tempo tão longo para a obtenção de um número razoável de falhas que, em casos particulares (como na indústria de equipamentos de informática), mudanças tecnológicas nos produtos tornam obsoleta a informação obtida.[22]

Em testes acelerados, coletam-se dados de desempenho de unidades em níveis altos (ou acelerados) de estresse e, a partir da análise desses dados, procura-se prever o desempenho das unidades em condições normais de uso. Para que tal previsão seja possível e válida, deve-se conhecer a relação entre o mecanismo causador das falhas e as condições ambientais, representadas por um ou mais fatores de estresse.

2.5- Viabilidade econômica

Sabe-se que o retorno do investimento financeiro para aquisição de um sistema solar fotovoltaico normalmente é de longo prazo e, por isso, existe a necessidade de um estudo para avaliar a viabilidade da aplicação do capital, utilizando parâmetros econômicos, a fim de auxiliar nas tomadas de decisões de investimentos. O processo de tomada de decisões financeiras ocorre segundo critérios racionais e envolve mensuração do fluxo de caixa com o custo do dinheiro no tempo, além da observação de outras taxas de rentabilidade do mercado. Assim,

uma proposta se torna atraente quando seu retorno apresenta uma taxa mais interessante que outros investimentos no mesmo espaço de tempo [23].

Prazo de recuperação do investimento ou Payback descontado. Prazo de recuperação do investimento é o tempo que o investimento leva para ser recuperado de acordo com o fluxo de caixa descontado.[24] Onde, leva-se em consideração a taxa de desconto antes de se proceder à soma dos fluxos de caixa e também deve-se levar em conta o período máximo aceitável pelo investidor para recuperar seu capital[25].O *payback* descontado costuma não ser uma ferramenta determinante para tomada de decisão, mas é uma técnica de apoio que ajuda na avaliação do investimento diante de seu fluxo de caixa no tempo, pois quanto mais breve for o período de *payback*, mais atraente será o investimento.[25]

3- METODOLOGIA

O sistema implementado neste trabalho é composto por um conjunto contendo 4 rastreadores solares ativos com um eixo de atuação, estes podem ser vistos na Figura 3.1. Cada rastreador é responsável pela movimentação de um módulo fotovoltaico, no eixo azimutal, durante o decorrer do dia. O objetivo desta montagem é fazer com que os módulos fotovoltaicos sigam a movimentação relativa do sol, fazendo com que os raios solares incidam de forma perpendicular sobre os módulos fotovoltaicos durante todo o dia, obtendo uma maior eficiência na geração de energia elétrica pelos mesmos.



Figura 3.1: Rastreadores solares.

Este Capítulo irá descrever o desenvolvimento de técnicas e ferramentas que foram utilizadas na construção do sistema.

3.1- Estrutura mecânica

A estrutura mecânica, como pode ser visto na Figura 3.2, conta com um poste fabricado em aço, este, tem formato cilíndrico e nele é encaixado uma bucha fabricada em nylon. A montagem conta também com uma haste, soldada ao poste, para o posicionamento do suporte que auxilia na movimentação dos rastreadores, como será explicado adiante.



Figura 3.2: Montagem mecânica

A armação para fixação dos módulos fotovoltaicos, mostrada na Figura 3.3, é fabricada em aço e contém 4 furos nos quais os módulos foram afixados por meio de parafusos. A armação conta também com tubo cilíndrico no qual é posicionado uma segunda bucha fabricada em nylon. Soldado a este tubo tem-se uma haste onde o motor é posicionado.



Figura 3.3: Armação para fixação dos módulos.

A movimentação dos rastreadores solares, ocorre a partir da movimentação da estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos que por sua vez é livre para se movimentar de forma angular com relação ao poste metálico. Esse movimento ocorre, pois, a bucha posicionada no poste é encaixada na bucha disposta na armação de fixação dos módulos e ao fato de ocorrer um movimento relativo entre as duas buchas.

Um motor de corrente contínua de 12 Volts, 1.3 Ampère e 9.12 N.m de força é o responsável pela movimentação do módulo fotovoltaico. O motor está ligado a extremidade de uma barra roscada de modo que a movimentação do motor faz com que a barra gire sobre seu próprio eixo. A barra rosca-se à porca fixada na haste do poste, essa movimentação da barra empurra ou puxa, a depender do sentido de giro do motor, toda a estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos, o que ocasiona na movimentação dos mesmos. Esse mecanismo é mostrado, na Figura 3.4 e é explicado de forma mais detalhada no capítulo destinado a manutenção mecânica.



Figura 3.4: Mecanismo para a movimentação dos módulos.

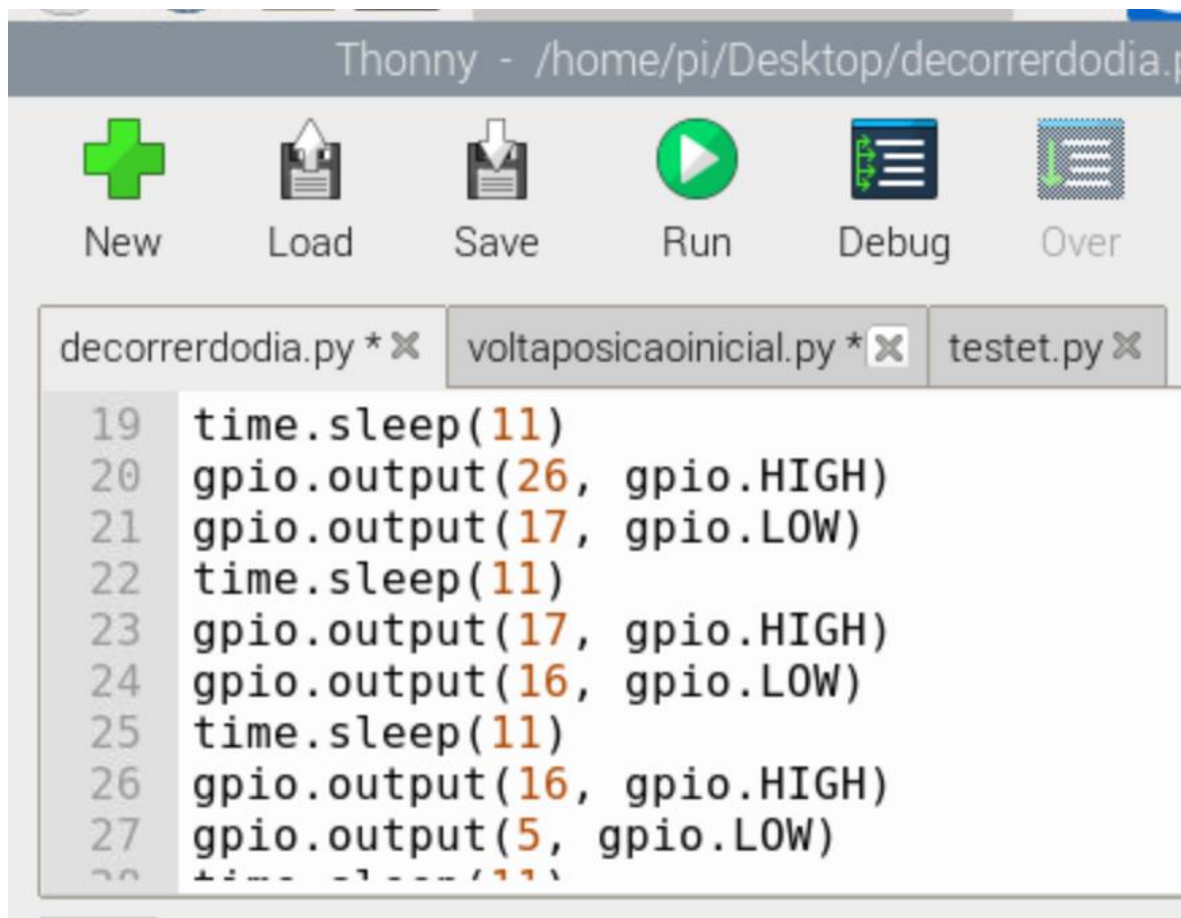
3.2- Sistema de controle

O sistema de controle da posição dos módulos fotovoltaicos, conta com um Raspberry Pi. O Raspberry é responsável pela aquisição e processamento de todos os dados de controle. Além do envio do sinal, para o sistema de acionamento, o que resulta na movimentação precisa dos módulos fotovoltaicos.

A programação principal conta com dois softwares, escritos em linguagem Python, um responsável pelo acionamento do motor no sentido horário, o que faz com que a superfície dos módulos se movimente no sentido de leste para oeste, esse programa é acionado várias vezes durante o dia. O outro software é responsável pelo acionamento dos motores no sentido anti-horário o que faz com o que superfície dos módulos se movimente no sentido oeste para leste, este programa é acionado no fim do dia de modo a fazer com que os módulos voltem para a posição inicial.

Os *softwares* tem como principal função comutar os pinos configurados como saída do Raspberry, entre os níveis lógicos baixo, quando se deseja acionar os motores, e alto, quando se deseja desligar os motores. Em momentos determinados o programa é executado fazendo com

que as saídas fiquem em nível lógico baixo em um período pré-determinado. A Figura 3.5 mostra uma parte do código, o código completo encontra-se em anexo, responsável por comutar o estado das GPIOs (*General Purpose Input/Output*) estas são portas programáveis de entrada e saída de dados. Isto acarreta na movimentação dos quatro motores e de seus respectivos rastreadores para a esquerda. Quando se deseja que os rastreadores se movimentem para a direita a programação é similar alterando apenas os GPIOs a serem comutados.



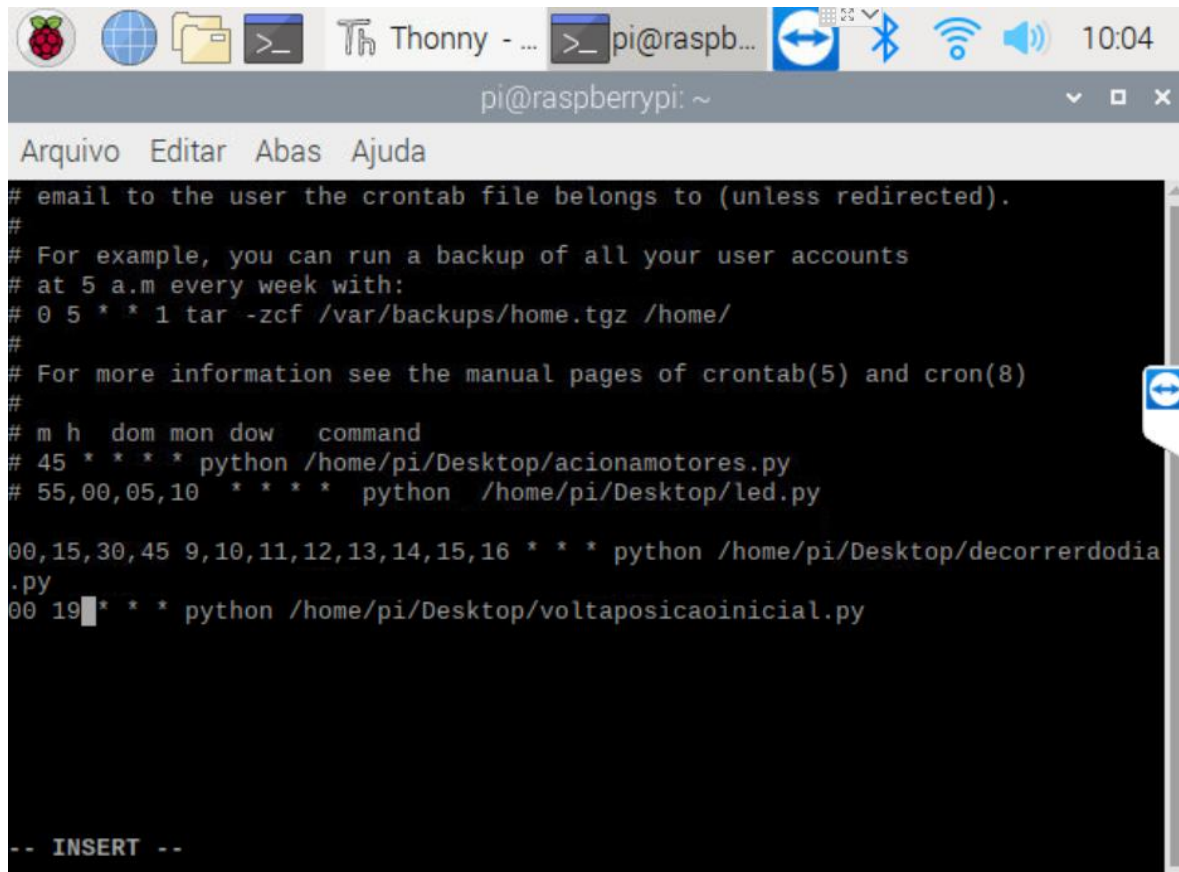
The image shows a screenshot of the Thonny Python IDE. The title bar reads "Thonny - /home/pi/Desktop/decorrerdodia.p". The toolbar contains icons for "New" (green plus), "Load" (document with arrow), "Save" (document with arrow), "Run" (green play button), "Debug" (blue bug icon), and "Over" (blue document with arrow). Below the toolbar, there are three tabs: "decorrerdodia.py * x", "voltaposicaooinicial.py * x", and "testet.py x". The active tab "decorrerdodia.py" shows the following code:

```
19 time.sleep(11)
20 gpio.output(26, gpio.HIGH)
21 gpio.output(17, gpio.LOW)
22 time.sleep(11)
23 gpio.output(17, gpio.HIGH)
24 gpio.output(16, gpio.LOW)
25 time.sleep(11)
26 gpio.output(16, gpio.HIGH)
27 gpio.output(5, gpio.LOW)
28 time.sleep(11)
```

Figura 3.5: Parte do código responsável pelo acionamento no decorrer do dia.

Para executar os programas nos momentos estabelecidos é utilizado a ferramenta de agendamento de tarefas *Cron*, mostrado na Figura 3.6, nela, é possível ver que o programa responsável pela movimentação no sentido Leste-Oeste é acionado de 9 as 17:00 horas de 15 em 15 minutos e o programa responsável pela movimentação no sentido Oeste-leste é acionado uma vez por dia as 19 horas.

Desta forma é possível programar, via terminal de comando do Raspberry, os momentos em que os programas responsáveis pelas comutações dos níveis lógicos das saídas são executados. De tal modo gasta-se menos processamento, devido ao fato de o programa não precisar ser executado em um loop ininterrupto, além da vantagem de que no caso de uma falha na energia o sistema continua funcionando assim que a energia for restituída.



```
pi@raspberrypi: ~
Arquivo  Editar  Abas  Ajuda
# email to the user the crontab file belongs to (unless redirected).
#
# For example, you can run a backup of all your user accounts
# at 5 a.m every week with:
# 0 5 * * 1 tar -zcf /var/backups/home.tgz /home/
#
# For more information see the manual pages of crontab(5) and cron(8)
#
# m h dom mon dow   command
# 45 * * * * python /home/pi/Desktop/acionamotores.py
# 55,00,05,10 * * * * python /home/pi/Desktop/led.py
00,15,30,45 9,10,11,12,13,14,15,16 * * * python /home/pi/Desktop/decorrerddia
.py
00 19 * * * python /home/pi/Desktop/voltaposicaoInicial.py

-- INSERT --
```

Figura 3.6: Ferramenta Cron

3.3- Sistema de Acionamento

Os motores responsáveis pelo correto posicionamento dos módulos fotovoltaicos são ligados ou desligados pelo sistema de acionamento. Esse sistema se faz necessário pois os sinais enviados pelo sistema de controle são de baixa tensão e corrente, desta forma o sistema de controle não é capaz de fazer, de forma direta, o acionamento dos motores. A Figura 3.7 apresenta o sistema de acionamento ligado ao sistema de controle.

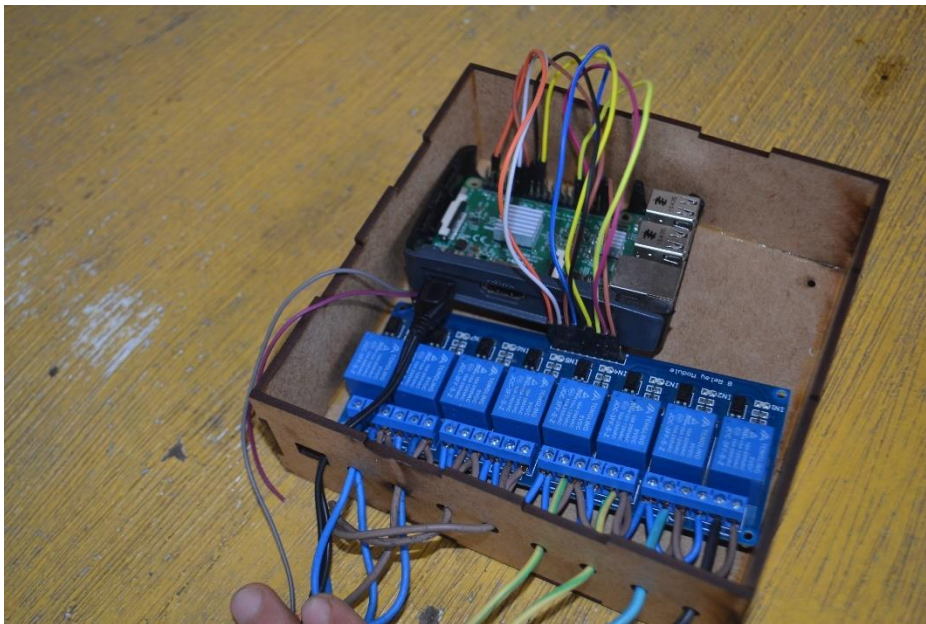


Figura 3.7: sistema de acionamento

O circuito de acionamento possui 8 relés, estes podem ser divididos em 4 pares, cada par de relés é responsável pelo acionamento de um motor, sendo, um relé aciona o motor no sentido horário e o outro aciona no sentido anti-horário, a Figura 3.8 apresenta o esquema elétrico de um desses pares.

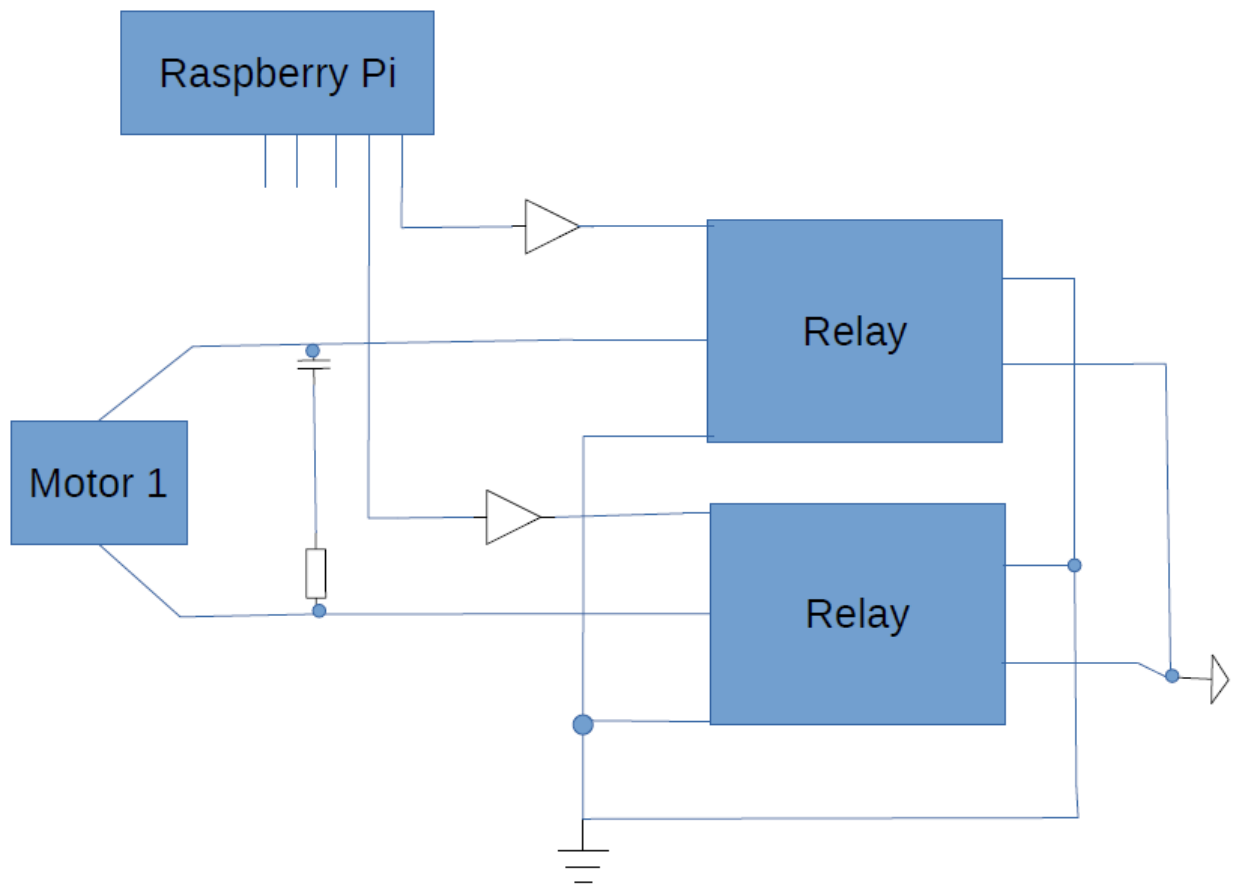


Figura 3.8: Esquemático do sistema de acionamento

Os relés utilizam os sinais elétricos de pequena potência, enviados pelo sistema de controle, para fechar seus contatos desta forma é possível controlar os circuitos de maior corrente e tensão que são responsáveis pelo acionamento dos motores elétricos.

O circuito de alta potência dos relés está ligado a uma fonte de 12 Volts de tensão, esta, se faz necessária para o acionamento dos motores CC.

3.4 Condições de Contorno

A instalação fotovoltaica utilizada conta com 4 módulos fotovoltaicos, instalados no bairro Inhame em Divinópolis. Os 4 módulos foram instalados a um ângulo de 22 graus com relação a superfície da terra.

A tabela 3.1 apresenta algumas características dos módulos que são da marca Risem e possuem 60 células cada.

Tabela 3.1: Especificações do módulo fotovoltaico.

Máxima Potência	260W
Tensão de Potência Máxima	30.60V
Corrente de Potência Máxima	8.50A
Corrente de Curto-Circuito	9,04A
Tensão Máxima do Sistema	1000V
Peso	18Kg

Os módulos foram conectados em série e ligados ao inversor Renovigi sf1600TI, de um 1.6KW, mostrado na Figura 3.9, através dele que foram captados os dados do sistema. Tabela 3.4 apresenta algumas características do inversor.



Figura 3.9: Inversor Renovigi 1.6k Plus.

Tabela 3.2: Especificações do inversor.

Vmax por entrada	550Vcc
Vnom por entrada	360Vcc
Vmpp por entrada	120V-500Vcc
I _{max} por entrada	13A
Tensão nominal de saída	220Aa.c
Eficiência máxima	97.7%
Potência máxima de saída -CA	1600W
Corrente máxima de saída	7,8A

3.4- Coleta de Dados

Os dados foram coletados, do nascer ao pôr do sol, durante quatro dias, sendo que destes, dois com sistema de rastreamento solar ligado e dois com o sistema inativo, o que equivaleria a uma instalação fixa. Desta forma foi possível obter valores de tensão, corrente, potência e energia gerada, sendo os dois últimos os mais utilizados como ferramenta para se comparar o sistema com o rastreador ativo e inativo. De posse destes resultados foi possível realizar uma análise do rendimento do sistema nas duas condições e se identificar o aumento na geração de energia quando se utiliza o rastreador solar em comparação com uma instalação fixa. Os dados de geração de energia foram retirados do inversor de frequência ligado ao conjunto de módulos. Foi utilizada a ferramenta *Solarman* onde é possível após o cadastro do inversor na plataforma se obter dados da geração de energia, inclusive com os gráficos na geração no decorrer do dia como o que pode ser visto na Figura 3.9.



Figura 3.9: Plataforma Solarman

Por motivos financeiros não foi possível construir dois sistemas equivalentes, sendo, um fazendo uso do rastreamento solar e o outro como uma instalação fixa. Desta forma os resultados estariam com todas as variáveis isoladas de modo que as diferenças obtidas entre as duas montagens dependeriam apenas da variável correspondente ao rastreamento solar.

No entanto os dados coletados do sistema com e sem rastreamento solar foram em dias diferentes. Desta forma os resultados poderiam vir a divergir da realidade tendo em vista a mudança do tempo entre um dia e outro.

Visando eliminar essas possíveis incongruências nos resultados foram tomadas duas medidas para dar fidedignidade aos dados coletados. A primeira é a de coletar dados em dias seguidos alternando entre o sistema de rastreamento ativo e inativo. Assim, se elimina possíveis efeitos na geração devido ao movimento de translação da terra. O movimento de translação deveria ser levado em consideração caso as medições fossem realizadas, por exemplo, em diferentes estações do ano.

A segunda e principal medida para se isolar o máximo de variáveis possíveis foi a utilização de um outro sistema de geração solar, que pode ser visto na Figura 3.10 instalado no mesmo local a menos de dez metros dos rastreadores solares, esse sistema conta com vinte módulos fotovoltaicos ativos e está ligado em um inversor independente. Esse segundo sistema é usado como controle para, assim, ser possível comparar o rendimento da instalação estudada, com e sem a utilização dos rastreadores solares, de forma mais precisa.



Figura 3.10: Sistema com 20 módulos.

3.5- Manutenção dos Rastreadores

Pôde-se estimar os custos de manutenção corretiva de forma precisa, pois como a estrutura mecânica, que foi reaproveitada no projeto, estava inativa e ao relento a alguns anos foi necessária a efetivação de uma manutenção corretiva geral de modo a poder-se aproveitar parte desta estrutura. Nos parágrafos seguintes são citados o que se realizou no âmbito de manutenção.

A seção que viria a ser responsável pela movimentação dos rastreadores estava completamente comprometida. Sendo necessário

refazer toda o mecanismo que seria acoplado as barras roscadas. Foram então adquiridas quatro barras roscadas e construídos os suportes que fixariam as barras nos rastreadores ao mesmo tempo que permitiria a movimentação dos mesmos. Para isto foi aproveitada parte da estrutura mecânica, onde foram soldadas porcas de três oitavos de polegada, compatível com a barra a ser utilizada.

A estrutura que faz a ligação entre o motor e a barra também foi fabricada. Como pode ser visto a Figura 3.11 a barra foi fixada, por meio de duas porcas, em um cilindro o qual teve a sua outra extremidade fixada na saída do motor por meio de um parafuso, foi soldada uma porca no cilindro para acomodar o parafuso responsável por impedir qualquer movimentação relativa entre o eixo do motor e o cilindro, desta forma o movimento angular do motor é inteiramente transferido ao cilindro que por sua vez o transmite à barra roscada.



Figura 3.11: Acoplamento da barra roscada ao motor

As buchas, fabricadas em nylon, também tiveram que passar por uma manutenção corretiva visto que cada par de buchas, como o mostrado na Figura 3.12, que deveriam ter uma movimentação relativa entre si, estavam praticamente fundidas uma na outra. Foi então necessário efetuar uma

separação mecânica fazendo uso de uma prensa hidráulica e em seguida foi dado um passe de torno na superfície interna da bucha que viria a ser afixada ao poste e na superfície externa da bucha que viria a ser presa à da estrutura de fixação dos módulos, desta forma, foi possível haver uma movimentação relativa entre as buchas.



Figura 3.12: Buchas com movimentação relativa entre si

No entanto dos quatro pares de buchas, esse procedimento foi bem-sucedido em apenas três, em um dos pares a bucha precisou ser retirada de forma destrutiva via processo de usinagem no torno mecânico e em seguida foi necessária a fabricação de outra bucha também via usinagem.

Foi preciso também efetuar a substituição de vários parafusos e outros elementos de fixação que se encontravam danificados e enferrujados

Essa manutenção corretiva acima citada foi necessária devido à falta de uma manutenção preventiva na estrutura. Fazendo uso de uma manutenção preventiva simples a maior partes destes problemas seriam evitados.

Uma boa manutenção preventiva nesse tipo de sistema deve se preocupar principalmente com a lubrificação das buchas, e proteger as barras roscadas e os parafusos de ferrugens com a utilização de sprays

antiferrugem por exemplo além de efetuar uma verificação dos motores e cabos. Além do retoque de tinta para proteger a estrutura contra ferrugem.

As Tabelas 3.3 exibe os gastos estimados para a manutenção corretiva que foi realizada.

Tabela 3.3: Estimativa de gastos com a manutenção corretiva.

Produto/ Serviço	Valor
Barras Roscadas	R\$: 26.00
0.5 Kg de Nylon 80 mm	R\$: 26.00
Elementos de Fixação	R\$: 34.30
Graxa De Uso Geral 90g	R\$: 5.80
Sprays Antiferrugem	R\$: 7.50
Serviços de Soldagem	R\$: 70.00
Serviços de Usinagem	R\$: 60.00
Serviços Técnicos no Local	R\$: 400.00
Tinta para metal	R\$:12.50
Total	R\$: 619.60

Os serviços de soldagem das porcas nos suportes para fixação das barras nos motores, serviços de usinagem das buchas e os serviços do técnico em mecânica responsável por desmontar e remontar a estrutura, trocar as barras e outros parafusos e outros elementos de fixação foram todos realizados pelo discente e seus valores foram estimados via entrevistas com profissionais capacitados.

A Tabela 3.4 apresenta os custos de produtos e serviços necessários para a efetivação de uma manutenção preventiva. Essa estimativa é feita partindo do pressuposto que a aplicação de graxa e spray antiferrugem, por se tratar de uma manutenção simples seria feita a cada 15 dias pelo próprio proprietário da estrutura, considerando pequenas instalações. Foi também incluído o valor da visita de um técnico, pelo menos uma vez por semestre, este que seria encarregado de realizar uma inspeção completa na estrutura de modo a encontrar e corrigir possíveis comprometimentos da montagem antes da ocorrência de alguma falha que impossibilitariam o melhor funcionamento do mecanismo caso não fossem corrigidos

Tabela 3.4: Estimativa de gastos com a manutenção preditiva.

Produto/ Serviço	Valor
Graxa De Uso Geral 90g	R\$: 5.80
Sprays Antiferrugem	R\$: 7.50
Tinta para metal	R\$: 12.50
Serviços técnicos no local	R\$: 70.00
Total	R\$: 95.8

Após uma análise das tabelas fica evidente a grande diferença de valores quando a manutenção é feita de forma corretiva para quando ela é praticada de forma preventiva. Deve-se ainda levar em consideração que durante todo o tempo que o sistema fica parado para a manutenção se está deixando de capitalizar com o mesmo.

No entanto algumas considerações precisam ser feitas. A manutenção que foi realizada é mais profunda e por consequência teve um custo mais elevado devido a estrutura estar a anos parada e ao relento ademais algumas melhorias no projeto precisaram ser realizadas. Além disso, mesmo quando a manutenção preventiva é realizada de forma constante, de tempos em tempos será necessária efetuar a substituição de alguma peça, devido ao desgaste natural, e da contratação de um profissional habilitado para fazer os devidos ajustes.

Mas mesmo com essas observações é possível afirmar que a realização de uma manutenção preventiva mitiga os custos além do mais, com o emprego deste tipo de manutenção o sistema fica menos tempo ocioso.

3.6- Limitações do sistema.

Mesmo com as melhorias na estrutura mecânica descritas na seção anterior o sistema continuou com algumas limitações, sendo que a principal delas ocorre devido ao ângulo entre o ponto em que o centro do módulo aponta o mais para o oeste possível e o ponto em que o centro do módulo aponta para o mais a leste possível é de aproximadamente 110 graus, como

pode ser visto nas Figura 13a e 13b, sendo que esse ângulo varia entre os quatro rastreadores.

Para um ótimo aproveitamento dos raios solares esse ângulo deveria ser de 180 graus, desta forma seria possível ter os raios solares incidindo sobre o rastreador de forma perpendicular durante todo o dia desde o nascer do sol ao leste até o seu pôr ao oeste. Desta forma com um ângulo de 110 graus o rastreador não faz com que o módulo fotovoltaico aproveite todo o potencial na geração de energia.



Figura 3.13a: Módulo voltado para o leste.



Figura 3.13b: Módulo voltado para o oeste.

A segunda limitação que precisa ser mencionada não é do sistema propriamente dito, mas do local onde o mesmo está instalado. Ao leste da instalação encontram-se árvores altas que promovem um sombreamento dos painéis nas primeiras horas da manhã. Esse sombreamento impede que os módulos exerçam todo o seu potencial na geração de energia.

Um último ponto que deve ser mencionado é que como está especificado nas condições de contorno do sistema o inversor utilizado precisa de uma tensão mínima de 120 Volts para o seu funcionamento correto, e como o sistema conta com apenas 4 módulos é necessária uma incidência solar um pouco mais elevada, quando comparado com sistemas com uma maior quantidade de módulos, para o acionamento do inversor. Isto pode afetar a geração nas primeiras horas da manhã e nas últimas horas da tarde.

3.6- Análise de Viabilidade Econômica

Para a realização de uma análise de viabilidade econômica do sistema de rastreamento solar o ganho na geração de energia obtido a partir

da utilização do sistema de rastreamento solar é convertido para um valor monetário. Concomitante a isso os custos de manutenção também são estimados.

De posse destes dados é possível determinar o prazo de recuperação do investimento ou *Payback*. A partir desses dados será possível inferir a respeito da viabilidade econômica do sistema de rastreamento solar.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ganho de Eficiência na Geração de Energia

Foram realizados testes inspecionando a potência instantânea diretamente no inversor. Esses testes foram realizados por volta de 9:45 horas do dia 08 de novembro de 2019 e seguiram a seguinte metodologia. Foi medida a potência instantânea gerada pela instalação com os módulos fotovoltaicos posicionados para o sol. Em seguida os módulos fotovoltaicos foram colocados na posição voltada para o norte geográfico, posição esta equivalente a de uma instalação fixa, e por fim os rastreadores foram posicionaram novamente os módulos voltados para o sol. Este procedimento foi realizado três vezes e os resultados podem ser vistos na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Efeito do Rastreador na Potência Instantânea.

	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média
Módulos Direcionados para o Sol	773 W	783 W	776 W	777,33 W
Módulos Direcionados para o Norte	596 W	612 W	602 W	603,33 W
Módulos Direcionados para o Sol	770 W	776 W	782 W	776 W

O valor medio das 6 medições feitas enquanto os módulos fotovoltaicos estavam direcionados para o sol foi de 776.7W e a média das 3 medições realizadas enquanto os módulos fotovoltaico estavam direcionados para o norte foi de 603.33

Desta forma encontrou-se uma diferença média de 174,37 W o que seria equivalente a um aumento de aproximadamente 29%, naquele momento específico, da instalação com os rastreadore ligados em relação a instalação fixa.

O gráfico apresentado na Figura 4.1 representa a variação da potência, gerada pelo sistema, longo do dia 07 de novembro de 2019. O sol ficou encoberto por nuvens durante praticamente todo o dia. Houve apenas alguns poucos instantes

em que os raios solares incidiram nos módulos fotovoltaicos sem, antes, precisarem transpor as nuvens estes instantes são representados pelos picos do gráfico.

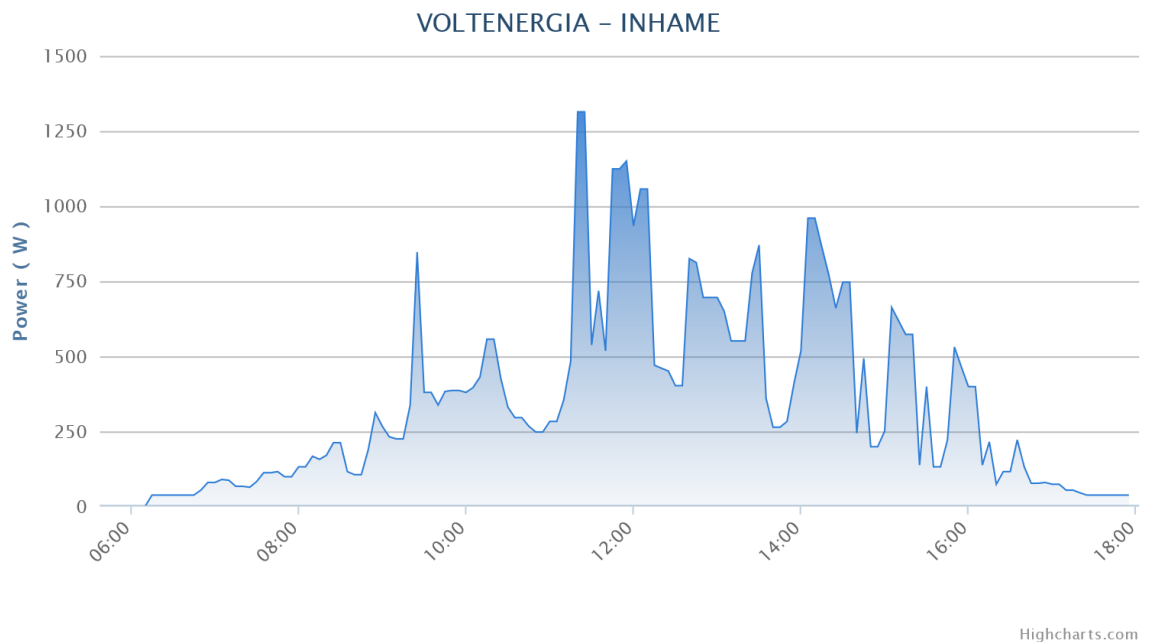


Figura 4.1 Variação da potência instantânea do dia 07 de novembro (com rastreamento)

Um ponto que deve ser ressaltado é que mesmo em um dia com o sol praticamente encoberto os rastreadores funcionaram da forma esperada, isto ocorreu graças ao sistema de rastreamento ser em malha aberta e funcionar sem a utilização de sensores, como apontado no artigo [3]. Uma limitação dos rastreadores que trabalham em malha fechada são possíveis erros de localização devido a maioria dos sensores serem luminosos, desta forma eles não tem um bom funcionamento em dias nublados.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam a variação da potência ao longo dos dias 9 e 10 de novembro respectivamente sendo que no dia 9 (1ª dia de medidas) o sistema de rastreamento solar estava em funcionamento e no dia 10 (2ª dia de medidas) ele se encontrava inatino. A geração foi de 4.58 KWh no dia 9 e 4.34KWh no dia 10.

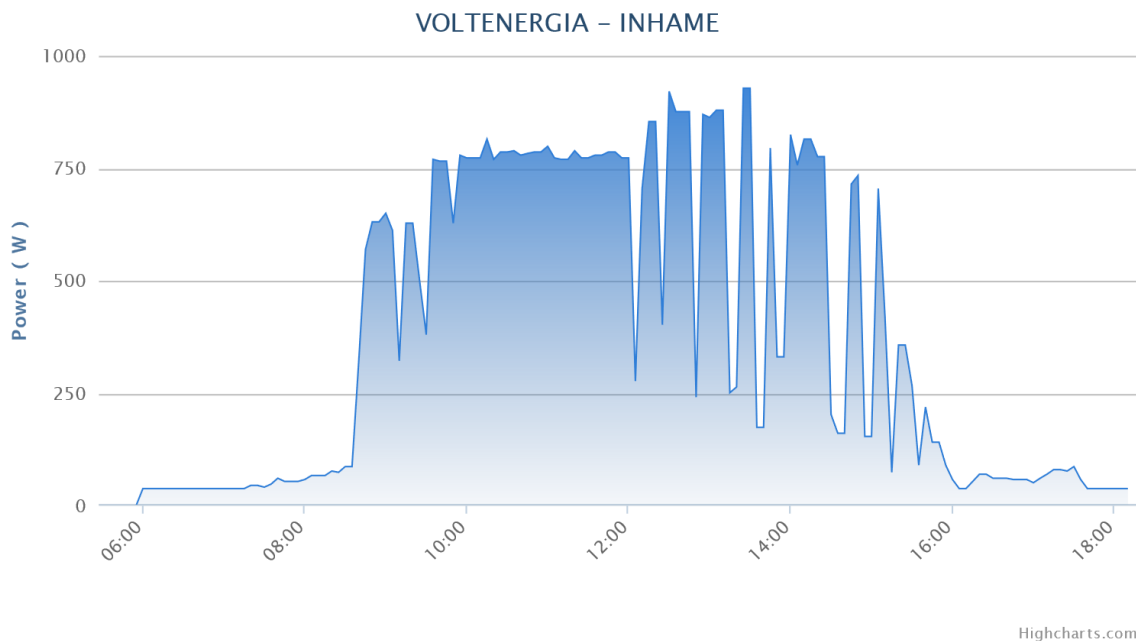


Figura 4.2:Variação da potência instantânea do 1ª dia de medidas (com o rastreamento).

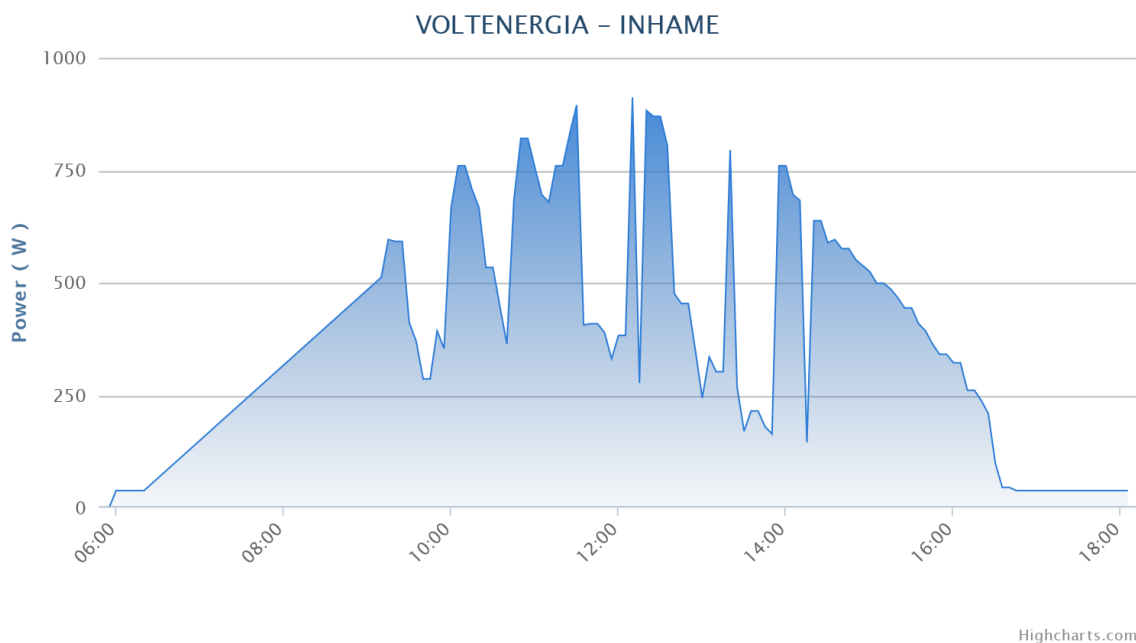


Figura 4.3: Variação da potência instantânea do 2ª dia de medida (sem o rastreamento).

No entanto a energia gerada pelo sistema de controle nos primeiro e segundo dia de medições respectivamente foi de 22.58KWh e de 24.68KWh o que equivale a um aumento na geração de 8.51 % no dia 10. Este aumento no segundo dia de medições, no sistema de controle, se deu devido a irradiação solar ter sido maior neste dia, quando comparado com o primeiro dia.

Se o rastreador não estivesse funcionando durante estes dois dias era esperado uma aumento na mesma proporção do sistema contendo 4 módulos. Este aumento deviria ocorrer na mesma proporção se o unico parametro variavel nestes dois dias fosse a o aumento da irradiação solar no segundo dia.

Desta forma, com os rastreadores inativos no dia 9 a geração deveria girar, em torno, de 3.97KWh, equivalente a 8.51% a menos que a geração do dia 10. Todavia, como o rastreador estava em funcionamento dia 9 e o sistema gerou 4.58KWh podemos inferir que o sistema de rastreamento solar foi responsavel por um aumento de 15.37% na geração de energia.

Na Figura 4.4 é possível visualizar as curvas de variação da corrente de entrada, do inversor de frequência, no tempo no primeiro e segundo dias de medição de novembro. Na curva à direita, colhida no segundo dia de medições, é possível ver que a corrente vai aumentando de forma gradual ate atingir seu ápice no meio do dia e em seguida o valor da corrente volta a cair. Isso ocorre devido a eficiência na geração de energia elétrica ser maior quando os raios solares incidem de forma perpendicular. E como o ângulo entre o sol e o módulo fotovoltaico é zero ao meio dia e máximo no nascer e por do sol gera-se esta curva característica.

Já na curva da esquerda é possível ver claramente a ação dos rastreadores solares. Como o rastreador busca anular o efeito do movimento relativo do sol ele deixa a curva com um formato mais quadrado pois aumenta a geração de energia quando o sol não esta em sua posição de meio dia.

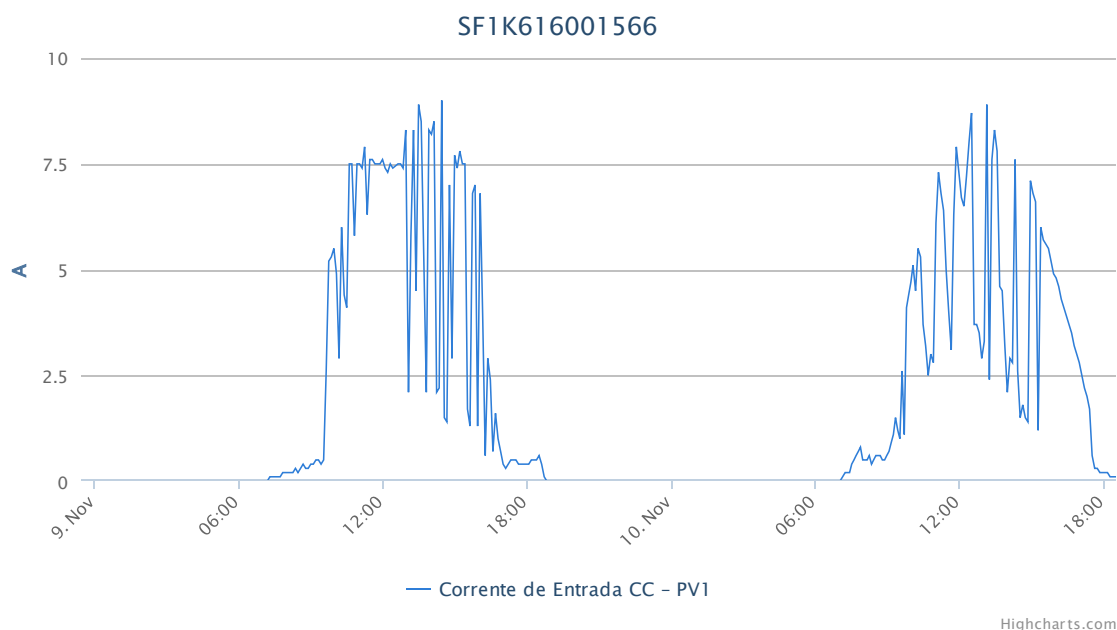


Figura 4.4: Curva da esquerda - com o rastreador e curva da direita - sem o rastreador.

Esta mesma metodologia é aplicada outra vez e os resultados são apresentados de forma mais direta a seguir. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os gráficos de potência instantânea no tempo dos dias 11 (3ª dia de medidas) e 12 (4ª dia de medidas) de novembro respectivamente. E a tabela 4.2 apresenta a energia gerada nesses dois dias.

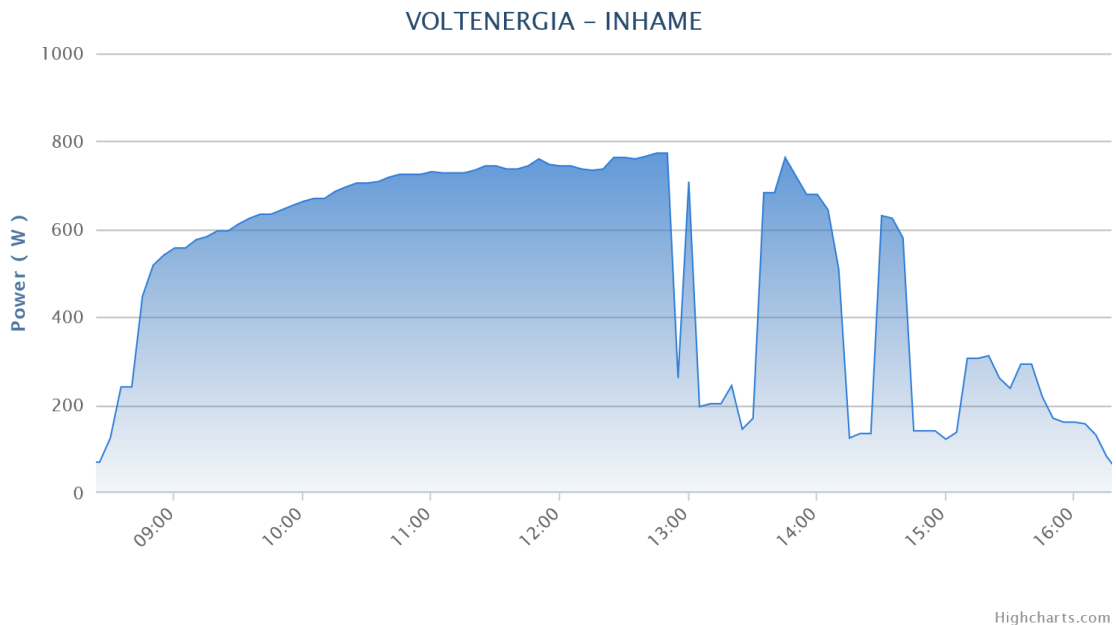


Figura 4.5: Variação da Potência Instantânea do 3ª dia de medidas (com o rastreamento).

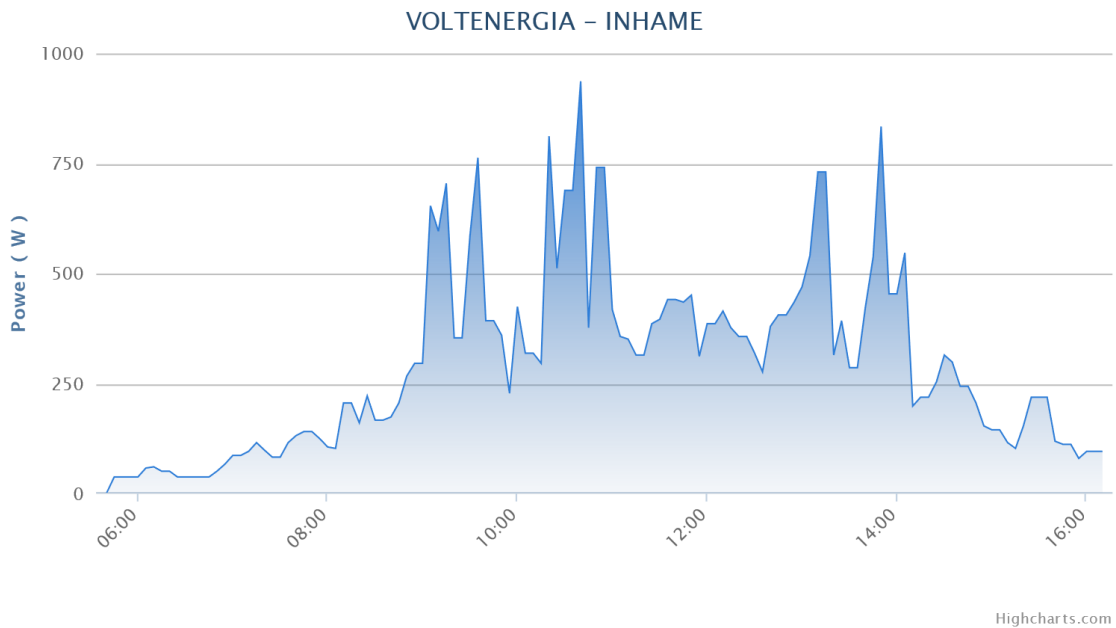


Figura 4.6 Variação da Potência Instantânea do dia 4ª dia de medidas (sem rastreamento).

Tabela 4.2: Energia gerada no terceiro e quarto dias de medição.

	Rastreador ativo(dia)	Rastreador Inativo(dia)
Sistema Sob Estudo	4.14 KWh	3.10 KWh
Sistema de Controle	21.83 KWh	18.54 KWh

- O sistema de controle apresentou um aumento de 17.7 % na geração.
- Com o rastreador inativo a geração do sistema sob estudo deveria ser de aproximadamente 3.64 KWh no dia 11.
- Rastreamento responsável por um aumento de cerca de 13.7 % na geração de energia.

4.2 Custos de manutenção

Para uma estimativa de manutenção do sistema fotovoltaico são considerados os custos de manutenção preventiva apresentados na tabela 3.3.

Além disso, são realizados testes de repetibilidade para se estimar o tempo necessário para a troca de algum componente mecânico. O teste seguiu a seguinte metodologia, um dos rastreadores é montado com o seu motor sendo substituído por um motor de limpador de para brisas automotivo. Então o software é configurado de modo ao rastreador se movimentar 3 minutos no sentido Leste-Oeste sendo que esses minutos foram divididos em 6 períodos de 30 segundos com o motor acionado e 5 segundos com o motor desligado ao final desse período o sistema configurado para que o rastreador seja acionado durante 3 minutos até voltar a posição inicial. Este código é colocado para rodar em loop e este procedimento é realizado em alguns dias. Observou-se que após cerca de 200 passagens, onde cada passagem representa um dia, a barra precisa ser substituída pois ela se enverga se não for substituída irá impossibilitar o funcionamento dos rastreadores. A Figura 4.7 mostra a barra fletida após os testes acelerados.



Figura 4.7: Barra fletida após os testes acelerados.

Desta forma é altamente recomendado a substituição das 4 barras roscadas na manutenção mais completa que é sugerida, na seção destinada a manutenção mecânica, a realização de forma semestral. Desta forma, a Tabela 4.3 apresenta os custos anuais estimados com a manutenção preventiva dos rastreadores solares, incluindo a substituição das barras roscadas.

Tabela 4.3: Custos da manutenção preventiva.

Produto/ Serviço	Quantidade	Valor Total
Graxa De Uso Geral 90g	1	R\$: 5.80
Sprays Antiferrugem	1	R\$: 7.50
Barras roscadas	8	R\$: 32.00
Serviços técnicos no local	2	R\$: 140.00
Total		R\$: 185.30

4.3 Análise da Viabilidade Econômica:

O sistema com os quatro módulos fotovoltaicos fixos irá gerar por mês em torno de 120 KWh. Considerando que o conjunto de módulos fotovoltaicos oferece um ganho na geração de energia elétrica em torno de 15%, o que seria equivalente a 18KWh por mês.

Tendo em vista que na região onde o estudo foi desenvolvido o valor do kWh cobrado pela concessionária atualmente é de R\$0,986, desta forma o ganho monetário anual obtido a partir da utilização dos rastreadores solares é de aproximadamente R\$213,00.

Porém o sistema de rastreamento solar apresenta gastos de manutenção que foram estimados na seção anterior e girão em torno de 198 reais ao ano.

O ganho líquido anual obtido a partir da utilização dos rastreadores pode ser, então, estimado na faixa de R\$28,00 reais.

Desta forma como o investimento para a implementação de um sistema deste tipo, incluindo valores de mão de obra são superiores a R\$2000,00 o Payback do negócio seria superior há 70 anos. Desta forma é possível afirmar, sem nem mesmo a necessidade de estudos com relação a taxa interna de retorno ou à taxa mínima de atratividade, que o sistema não é viável.

Como mencionado em [26] sistemas que utilizam rastreadores solares em geradores de pequeno porte podem ser inviáveis devido ao sistema de rastreamento ser composto de partes móveis e motores, desta forma, apresentam uma vida útil muito menor que a dos painéis necessitando de manutenção muito mais custosa.

Seria mais interessante para o proprietário de uma pequena instalação investir na aquisição de novos módulos fotovoltaicos ao invés de construir uma estrutura de rastreamento solar. Essa opção seria mais interessante, inclusive no tocante a espaço, pois estruturas com rastreamento necessitam de espaço para realizar a movimentação dos painéis e para evitar que um módulo promova sombreamento no outro.

5- CONCLUSÕES

A partir dos resultados mostrados na análise e discussão, pode-se tirar as seguintes conclusões sobre a utilização dos rastreadores solares.

- 1) A utilização dos rastreadores fotovoltaicos, de fato, promove um ganho na energia gerada a partir de módulos fotovoltaicos;
- 2) Dependendo da complexidade do sistema a ser utilizado os custos com a manutenção mecânica da estrutura pode ser elevada;
- 3) Em geral o investimento em mais módulos fotovoltaicos tende a ser mais interessante do que em um sistema de rastreamento solar.

6- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Um trabalho interessante que poderia vir a ser desenvolvido, aproveitando o sistema proposto seria acrescentar o controle da movimentação de um segundo eixo de movimentação, no caso o eixo tilt. Desta forma é possível uma análise do ganho do rendimento e dos custos com a manutenção em um rastreador com dois eixos de movimentação. Porém antes disso seria interessante aumentar o comprimento da haste, onde o motor é fixado, desta forma o movimento do rastreador seria completo realizando um ângulo de 180 graus entre a posição inicial e final.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] z. e. and s. marangozogl, “new design for solar panel tracking system based on solar calculations,.” 2018.
- [2] d. k. b. and m. a. s. s. v. mitrofanov, “simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker,” 2018.
- [3] r. u. sabran and a. c. fajardo, “sunflower inspired solar tracking strategy: a sensorless approach for maximizing photovoltaic panel energy generation,” 2018.
- [4] g. d. meceneiro, “desenvolvimento de um sistema para rastreamento solar,” 2018.
- [5] á. d. de; oliveira, *sistema de rastreamento solar automático baseado em algoritmo de posição solar aplicado a um refletor fresnel linear.* .
- [6] “energia fotovoltaica | portal solar - tudo sobre energia solar fotovoltaica.” [online]. available: <https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>. [accessed: 28-mar-2019].
- [7] c. h. g. santos, “desviadores de corrente de arquitetura híbrida para compensação de sombreamento parcial em associações série de módulos fotovoltaicos,” 2018.
- [8] “conheça 7 incentivos governamentais para quem usa energia solar - engie solar.” [online]. available: <https://blog-solar.engie.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/>. [accessed: 01-apr-2019].
- [9] “introdução a sistemas de energia soar fotovoica,” *www.blue-sol.com*. 2016.
- [10] d. coelho, “universidade federal do vale do são francisco,” p. 86, 2013.
- [11] n. dos and o. para, “rastreamento diário e anual dos níveis máximos de radiação solar para otimização da produção fotovoltaica,” 2013.
- [12] h. a. e. salama and a. t. mohamed taha, “practical implementation of dual axis solar power tracking system,” *2018 twent. int. middle east power syst. conf.*, pp. 446–451, 2019.
- [13] m. m. oliveira, “análise do desempenho de um gerador solar fotovoltaico com seguidor solar azimutal,” *univ. fed. do rio gd. do sul programa*, 2008.
- [14] p. d. e. p. em, “universidade federal do ri o grande do sul análise e construção de um piranometro fotovoltaico para obtenção do título de mestre em engenharia porto alegre,” 1991.

- [15] e. c. paiva, “desenvolvimento de um rastreador solar microcontrolado para um coletor solar concentrador,” 2009.
- [16] r. arreola gómez, a. quevedo nolasco, m. castro popoca, á. bravo vinaja, and d. reyes muñoz, “diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico ,” *rev. mex. ciencias agrícolas* , vol. 6, pp. 1715–1727, 2015.
- [17] m. catelani, l. ciani, l. cristaldi, m. faifer, and m. lazzaroni, “electrical performances optimization of photovoltaic modules with fmeca approach,” *meas. j. int. meas. confed.*, vol. 46, no. 10, pp. 3898–3909, 2013.
- [18] c. a. a. de oliveira, “rastreador solar de baixo custo e sem o uso de baterias,” 2007.
- [19] a. greco, “prática da manutenção.”
- [20] et al. brito, mário, “manual pedagógico pronaci manutenção.,” *assoc. empres. port. .*, 2003.
- [21] j. wyrelski, “manutenção produtiva total-um modelo adaptado.,” 1997.
- [22] j. l. d. flavio; ribeiro, “confiabilidade e manutenção industrial.,” 2009.
- [23] i. d. e. máquinas, p. p. investimento, and o. r. giasson, “análise dos índices financeiros e econômicos” pp. 1–21.
- [24] e. teixeira, “gestão financeira em micro empresas familiares : um estudo na indústria moveleira de santa cruz de minas - mg,” pp. 1–17.
- [25] l. j. (gitman, “princípios da administração financeira,” 2004.
- [26] f. camargo, “estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos,” p. 67, 2014.

9- ANEXOS

Anexo A: Software responsável pela movimentação dos módulos no decorrer do dia.

```
import RPi.GPIO as gpio
import time

gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(26, gpio.OUT)#gira o ratreador 1 para a direita
gpio.setup(17, gpio.OUT)#gira o ratreador 2 para a direita
gpio.setup(16, gpio.OUT)#gira o ratreador 3 para a direita
gpio.setup(5, gpio.OUT)#gira o ratreador 4 para a direita

gpio.output(26, gpio.HIGH)
gpio.output(5, gpio.HIGH)
gpio.output(16, gpio.HIGH)
gpio.output(17, gpio.HIGH)
time.sleep(2)

gpio.output(26, gpio.LOW)
time.sleep(11)
gpio.output(26, gpio.HIGH)
gpio.output(17, gpio.LOW)
time.sleep(11)
gpio.output(17, gpio.HIGH)
gpio.output(16, gpio.LOW)
time.sleep(11)
gpio.output(16, gpio.HIGH)
gpio.output(5, gpio.LOW)
time.sleep(11)
gpio.output(5, gpio.HIGH)
```

Anexo B: Software responsável pela movimentação dos módulos no final do dia.

```
import RPi.GPIO as gpio
import time
```

```
gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(6, gpio.OUT)#gira o ratreador 1 para a esquerda
gpio.setup(27, gpio.OUT)#gira o ratreador 2 para a esquerda
gpio.setup(23, gpio.OUT)#gira o ratreador 3 para a esquerda
gpio.setup(24, gpio.OUT)#gira o ratreador 4 para a esquerda
```

```
gpio.output(6, gpio.HIGH)
gpio.output(27, gpio.HIGH)
gpio.output(24, gpio.HIGH)
gpio.output(23, gpio.HIGH)
time.sleep(2)
```

```
gpio.output(6, gpio.LOW)
time.sleep(176)
gpio.output(6, gpio.HIGH)
gpio.output(176, gpio.LOW)
time.sleep(30)
gpio.output(27, gpio.HIGH)
gpio.output(23, gpio.LOW)
time.sleep(176)
gpio.output(23, gpio.HIGH)
gpio.output(24, gpio.LOW)
time.sleep(176)
gpio.output(24, gpio.HIGH)
```