

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

ALEXANDRINO TADEU FELONTA PEREIRA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE
POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO DE PAINEL SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Juiz de Fora, MG - Brasil

Julho de 2016

ALEXANDRINO TADEU FELONTA PEREIRA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE
POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO DE PAINEL SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Trabalho final, apresentado a Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: André Augusto Ferreira

Juiz de Fora, MG - Brasil

Julho de 2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

PEREIRA, Alexandrino Tadeu Felonta.
Projeto, construção e análise de um sistema de posicionamento automático de painel solar fotovoltaico

/

Alexandrino Tadeu Felonta Pereira. -- 2016.

65 f. : il.

Orientador: André Augusto Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) –
Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia,
2016.

1. Painel solar fotovoltaico. 2. Posicionamento automático. 3.
Conversão de energia

ALEXANDRINO TADEU FELONTA PEREIRA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE
POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO DE PAINEL SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Trabalho final, apresentado a Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: André Augusto Ferreira

Aprovada em 03 de agosto de 2016

Prof. André Augusto Ferreira, Dr.Eng. (Orientador)

Prof. Pedro Machado de Almeida, Dr.Eng.

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas conquistas alcançadas durante toda minha vida acadêmica.

Ao meu pai José, minha mãe Silvânia, e minhas irmãs Barbarelli e Celina que sempre ao meu lado me deram todo o suporte indispensável na consolidação do meu caráter.

Agradeço ao professor André Augusto Ferreira por ter confiado em mim à tarefa de desenvolver esse trabalho que tanto me motivou e ao mesmo tempo desafiou a buscar sempre o melhor.

A Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF pelo suporte à pesquisa e ao programa Bolsa de Iniciação Científica – BIC.

Ao amigo e companheiro de trabalho Jhonatan Brandel pelo esforço e dedicação a esse trabalho que muito contribuiu na consolidação de meu conhecimento.

Agradeço ao professor Marcos Borges e ao Técnico em Mecânica Guilherme Pires pela ajuda nas simulações e construção das peças da estrutura mecânica desenvolvida nesse trabalho.

Ao professor Pedro Machado que muito me ajudou nas pesquisas teóricas relacionadas ao assunto desse trabalho.

Ao José Américo, Técnico administrativo do Laboratório Solar pelo companheirismo e pelos conselhos que muito me motivaram a continuar na caminhada.

Aos bolsistas do Laboratório Solar pela amizade, ajuda e companheirismo durante todos esses anos.

Aos colegas de curso, pelos anos de alegria e companheirismo e pelos ensinamentos que muito me ajudaram durante todo o período da faculdade.

Estou convicto de que as experiências e aprendizados, bem como as lições de vidas adquiridas por conviver com pessoas experientes, certamente foram de grande importância para a construção do meu caráter profissional. Pretendo, portanto, com o aprimoramento das experiências adquiridas ter condições de atuar profissionalmente, conhecendo o processo da empresa que eu atue, preocupando-me sempre em adaptar-me as novas realidades sem perder o objetivo principal de um Engenheiro Eletricista.

“Nossas virtudes e nossos sentimentos são inseparáveis, assim como força e matéria. Quando se separam, o homem deixa de existir.”. (Nikola Tesla)

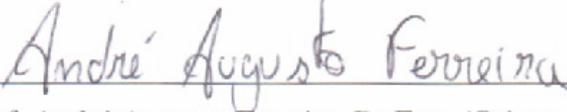
ALEXANDRINO TADEU FELONTA PEREIRA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE
POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO DE PAINEL SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Trabalho final, apresentado a Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: André Augusto Ferreira

Aprovada em 03 de agosto de 2016



Prof. André Augusto Ferreira, Dr.Eng. (Orientador)



Prof. Pedro Machado de Almeida, Dr.Eng.



Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo implementar um protótipo para aumentar a eficiência no processo de conversão de energia solar em eletricidade. A estrutura projetada e construída busca automaticamente manter a incidência perpendicular dos raios do Sol em relação à superfície plana de um painel fotovoltaico.

A presente monografia aborda o modelo matemático para determinar a posição do Sol ao longo do dia, a montagem experimental para movimentação do painel em dois graus de liberdade, conversor estático para condicionamento da energia gerada pelo painel, resultados experimentais e análise do desempenho dos sistemas de painel fixo e de painel com ajuste automático de posição.

Projeto, construção e análise de um sistema de posicionamento automático de painel solar fotovoltaico

Alexandrino Tadeu Felonta Pereira

Julho, 2016

Orientador: André Augusto Ferreira

ABSTRACT

This work aims to implement a prototype to increase efficiency in solar energy conversion process into electricity. The designed and built structure seeks to maintain automatically the incidence of the sun's rays perpendicular towards the flat surface of a photovoltaic panel.

This thesis discusses the mathematical model to determine the position of the sun throughout the day, the experimental setup for panel movement in two degrees of freedom, static converter for conditioning the power generated by the panel, experimental results and systems performance analysis of fixed panel and of panel with automatic position adjustment.

Design, construction and analysis of an automatic positioning system photovoltaic solar panel

Alexandrino Tadeu Felonta Pereira

July, 2016

Supervisor: André Augusto Ferreira

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Insolação média anual na superfície terrestre	19
Figura 2: Movimento do sol ao longo das estações.....	19
Figura 3: Plano elíptico da órbita da Terra.....	20
Figura 4: Ângulos para posicionamento solar.....	23
Figura 5: Usina Solar Fotovoltaica da UFJF.....	24
Figura 6: Maquete da Usina Solar da UFJF.....	25
Figura 7: Planta baixa da Usina Solar da UFJF.....	26
Figura 8: Obtenção do perfil dos obstáculos.....	27
Figura 9: Projeção estereográfica do local com os sombreamentos previstos.....	27
Figura 10: Tela do Software Radasol 2.0.....	28
Figura 11 - Variação da radiação de acordo com a inclinação dos painéis fotovoltaicos.....	29
Figura 12: Carta solar de Juiz de Fora.....	30
Figura 13: Projeto da estrutura azimutal de dois eixos.....	31
Figura 14: Estrutura mecânica para posicionamento automático de um painel solar fotovoltaico.....	31
Figura 15: Mecanismo do movimento azimutal e de inclinação.....	32
Figura 16: Detalhe da montagem do mecanismo do movimento azimutal e de inclinação.....	32
Figura 17: Micro redutor DC AK510 c/ caixa de redução.....	33
Figura 18: Engrenagens de máquina de frango.....	34
Figura 19: Módulo Fotovoltaico BPSX120U.....	34
Figura 20: Driver L298N.....	35
Figura 21: Diagrama de blocos do L298N.....	35
Figura 22: Esquemático do circuito desenvolvido.....	36
Figura 23: a) Esquemático do PCB; b) Placa montada.....	37
Figura 24: Kit Arduino Mega 2560.....	37
Figura 25: Esquemático do circuito conversor abaixador de tensão.....	38
Figura 26: Fluxograma do algoritmo P&O.....	39
Figura 27: Método para calibração dos eixos em graus.....	40
Figura 28: Curva de posição do eixo de elevação.....	41
Figura 29: Curva de velocidade do eixo de elevação.....	41
Figura 30: Inclinação do painel fixo.....	42
Figura 31: haste para verificação da perpendicularidade dos raios incidentes do Sol.....	43
Figura 32: Curvas de corrente versus tensão para diferentes condições de irradiação.....	45
Figura 33: Curvas de potência versus tensão para diferentes condições de irradiação.....	45
Figura 34: Curvas de corrente versus tensão para diferentes condições de temperatura.....	46
Figura 35: Curvas de potência versus tensão para diferentes condições de temperatura.....	46
Figura 36: Curva de potência fornecida pelos sistemas com controle MPPT.....	47
Figura 37: Radiação incidente do dia 13/07/2016.....	48
Figura 38: Curva de potência fornecida pelos sistemas com cargas fixas.....	49
Figura 39: Radiação incidente do dia 27/07/2016.....	49
Figura 40: Curva da temperatura ambiente do dia 27/07/2016.....	50
Figura 41: Curvas de temperatura ambiente e temperaturas dos painéis.....	51
Figura 42: Curva da temperatura do painel experimental e simulada.....	52
Figura 43: Sensor de corrente ACS712.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações técnicas motoredutor AK510.....	33
Tabela 2: Controle bidirecional de motor.....	36
Tabela 3: Características elétricas do painel BPSX120U.....	44
Tabela 4: Comparação da energia gerada pelos dois sistemas dia 13/07/2016.....	48
Tabela 5: Comparação da energia gerada pelos dois sistemas dia 27/07/2016.....	50
Tabela 6: Comparação da energia gerada pelo sistema móvel experimental versus simulado	51
Tabela 7: Consumo do sistema de posicionamento automático.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

ANEEL	: Agência Nacional de Energia Elétrica;
EOT	: <i>Equation of Time</i> ;
FINEP	: Financiadora de Estudos e Projetos;
IAD	: Instituto de Artes e Designer;
IC	: <i>Incremental Conductance</i> ;
INERGE	: Instituto Nacional de Energia Elétrica;
LABSOLAR	: Laboratório Solar da Universidade Federal de Juiz de Fora;
LABSOL	: Laboratório de Energia Solar da UFRGS;
LABEL	: Laboratório de Eletrônica da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFJF;
LSTM	: <i>Local Standard Time Meridian</i> ;
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracking</i> ;
MPP	: <i>Maximum Power Point</i> ;
NOCT	: <i>Nominal Operating Cell Temperature</i> ;
PCB	: <i>Printed Circuit Board</i> ;
P & O	: <i>Perturb and Observe</i> ;
RTC	: <i>Real Time Clock</i> ;
STC	: <i>Standard Reporting Conditions</i> ;
UFJF	: Universidade Federal de Juiz de Fora;
UFRGS	: Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
TTL	: <i>Transistor-Transistor Logic</i> ;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1. CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	16
1.2 Contribuições do Trabalho	16
1.3 Estrutura do Trabalho	17
2. CAPÍTULO 2 - REVISÃO TEÓRICA	18
2.1 Energia Solar	18
2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica	18
2.2 Geometria Solar	19
2.2.1 Ângulos da geometria solar	20
3. CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	24
3.1 Instalações da Usina Solar Fotovoltaica da UFJF	24
3.2 Local de instalação	25
3.3 Orientação dos painéis	28
3.4 Descrição do protótipo	30
3.4.1 Motores de corrente contínua	33
3.4.2 Engrenagens	33
3.4.3 Pannel solar fotovoltaico	34
3.4.4 Placa driver	34
3.4.5 Microcontrolador	37

3.5	Carga dos sistemas	37
3.6	Calibração do sistema de posicionamento automático	39
3.6.1	Curva de posição e velocidade da estrutura	41
3.7	Metodologia	42
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE RESULTADOS		44
3.8	Características do painel solar	44
3.9	Resultados experimentais	47
3.9.1	Consumo do sistema de posicionamento automático	53
4. CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		55
4.1	Trabalhos futuros	56
5.	REFERÊNCIAS	57
A.1	Código do modelo do painel BPSX120U	58
A.2	Projeto da estrutura mecânica	59
A.3	Orçamentos	64

Capítulo 1

Introdução

O ser humano sempre buscou formas de utilizar a energia disponível na natureza em seu proveito. O fogo proporcionou ao homem primitivo, luz e calor. O seu domínio permitiu cozer alimentos e forjar novos materiais. À medida que as civilizações se desenvolviam, o homem passou a ter uma maior necessidade de aproveitar o uso desta e de outras fontes energéticas.

Segundo Palz (1981) o consumo de combustíveis fósseis, bem como a energia utilizada pelo homem até meados do século XVIII era insignificante comparada com o uso crescente iniciado pela Revolução Industrial. O desenvolvimento da Máquina a Vapor permitiu um significativo aumento da produtividade, mas levou ao primeiro grande desequilíbrio entre oferta e demanda de energia.

As fontes energéticas que suprem grande parte da energia elétrica no mundo atual são provenientes dos combustíveis fósseis, como carvão e derivados do petróleo. Por se tratar de um recurso não renovável, sua utilização é questionada tanto em relação à sustentabilidade do modelo energético quanto às consequências ambientais.

A energia proveniente da luz solar é um recurso inesgotável, com potencial para suprir diversas vezes toda a demanda de energia do planeta. A conversão da luz do Sol em eletricidade pode ocorrer pelo emprego de concentradores solares em usinas termoeletricas ou pelo uso de painéis solares fotovoltaicos que geram eletricidade diretamente a partir da conversão da radiação luminosa proveniente do Sol (ANEEL, 2008).

A crescente demanda por energia na atualidade tem levado os governos de vários países a buscar alternativas energéticas para a geração de energia elétrica. A procura por tal tecnologia e o aumento das empresas produtoras dos módulos fotovoltaicos possibilitou sua utilização em locais de difícil atendimento da rede elétrica convencional.

Os módulos fotovoltaicos comerciais produzidos têm como matéria prima principal o silício. O seu preço de venda ainda é considerado alto, entretanto o atual estado da tecnologia

fotovoltaica segundo Valentim (2015) continua a fazer progressos rápidos em direção à competitividade no setor da eletricidade.

A relação custo-benefício de empreendimentos fotovoltaicos ainda é controversa, uma vez que a produção de energia elétrica proveniente de instalações de sistemas solares fotovoltaicos sofre grande variação devida principalmente ao baixo índice de rendimento na conversão de energia elétrica perante a sua real capacidade. Discussões a respeito da enorme quantidade de energia que é gasta para a produção dos painéis são grandes. Existem autores que dizem que é deficitário, uma vez que se gasta mais eletricidade para fazer um painel do que ele será capaz de produzir ao longo da sua vida útil.

Existem diversas pesquisas para aumentar significativamente a produção de eletricidade nos módulos fotovoltaicos. Algumas empresas investiram em projetos de seguidores solares. Os protótipos desenvolvidos obtiveram um aumento da ordem de 30% a 40% na produção de energia elétrica (OLIVEIRA, 2008).

1.1 Motivação

A proposta desse estudo tem como motivação a continuação de trabalhos iniciados por ex-alunos de Engenharia Elétrica da UFJF. No desenvolvimento do projeto “Rastreador Solar de Máxima Potência” houve considerável contribuição no que diz respeito às pesquisas teóricas relacionadas ao assunto, que serviu de grande ajuda para os trabalhos até então continuados. Sendo assim, este trabalho foi motivado como uma forma de dar continuidade a uma linha de pesquisa que tinha como premissa inicial a construção de um protótipo mecânico de um rastreador solar, capaz de perseguir pontos de maior incidência solar de acordo com a movimentação relativa entre Terra e Sol.

1.2 Contribuições do Trabalho

O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo, em termos de energia gerada, de sistemas fotovoltaicos com instalação fixa e móvel. Para o sistema de posicionamento automático foi desenvolvido um protótipo de um rastreador solar azimutal de

dois eixos de movimento. Algoritmos de posicionamento solar foram desenvolvidos em linguagem de programação própria do microcontrolador Atmega do kit de desenvolvimento Arduino. Para a simulação de carga foram utilizadas técnicas de MPPT¹ para o sistema fixo e o sistema móvel proposto.

O resultado obtido nesse estudo foi importante para verificar o quanto de energia deixa de ser gerada pelos sistemas de instalação fixa. Muito embora, seja de conhecimento o baixo rendimento de módulos fotovoltaicos comerciais, o insucesso de uma instalação fotovoltaica fixa deriva exclusivamente nesse fato. Dessa forma, pretende-se com esse trabalho obter uma base de dados para comparação futura da energia gerada pelos dois sistemas e obter uma possível avaliação da eficiência dos sistemas como um todo.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 apresentou uma abordagem motivacional ao trabalho, excetuando-se os objetivos pretendidos bem como a organização do mesmo.

No capítulo 2 é apresentado uma revisão teórica sobre o assunto, abordando as equações matemáticas de posicionamento solar.

No capítulo 3 é apresentado a estrutura do protótipo de rastreamento de dois eixos projetada para esse trabalho.

No capítulo 4 é apresentado as análises dos dados experimentais obtidas com o sistema supervisorio proposto afim de analisar a eficiência na geração.

No capítulo 5 é apresentado a conclusão do trabalho bem como propostas para futuros trabalhos.

¹ MPPT - Maximum Power Point Tracking, consiste numa técnica de rastreamento do ponto de máxima potência de módulos fotovoltaicos.

Capítulo 2 - Revisão Teórica

2.1 Energia Solar

Como fonte primária, a energia advinda do Sol dá origem a quase todas as outras formas de energia ditas secundárias. Essa fonte de energia além de ser responsável pela vida na Terra tem grande potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia, notadamente, a térmica e a elétrica.

A taxa em que a energia solar atinge a Terra é chamada de irradiação solar. A intensidade da radiação emitida pelo Sol é relativamente constante. Essa radiação, não atinge de maneira uniforme toda a crosta terrestre. Sua intensidade depende predominantemente da latitude, da estação do ano e de condições atmosféricas como, por exemplo, nebulosidade e umidade relativa do ar. Na atmosfera terrestre parte dessa radiação é refletida. Grande parte do restante é absorvida pela água, pelo solo e pelas plantas (ALBRIGTSEN, 2006).

2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da luz solar em energia elétrica. A unidade básica de conversão é a célula fotovoltaica e seu princípio de funcionamento é explicado através do efeito fotovoltaico. Edmond Becquerel, em 1839, constatou que uma estrutura feita de material semicondutor, ao ser submetido a uma exposição de luz estabelecia uma diferença de potencial entre seus extremos. Essa descoberta representa um marco na história do efeito fotoelétrico e os avanços que o sucederam possibilitaram a criação das primeiras estruturas semicondutoras. A primeira célula fabricada utilizou o silício como matéria prima, foi feita em 1954 por Pearson, Fuller e Chapin (PALZ, 1981). Segundo Palz (1981) no mesmo ano foi desenvolvido pela primeira vez um processo para a purificação de monocristais de silício. A sua produção industrial foi iniciada em 1956 juntamente com o desenvolvimento da microeletrônica, marcado por uma rápida expansão da produção. Anos mais tarde a tecnologia das células fotovoltaicas tornou-se decisiva na indústria aeronáutica. Nos programas espaciais houve considerável investimento na tecnologia fotovoltaica, uma vez que ela representava a forma de geração de energia com melhor custo-benefício. Palz (1981) argumenta que em 1970 para colocar 1 kg de satélite em órbita da Terra custava mais de US\$ 20.000. A razão do sucesso das células solares fotovoltaicas deve-se a sua menor massa em comparação a qualquer outra fonte e sua grande confiabilidade em relação às baterias eletroquímicas.

2.2 Geometria Solar

O planeta Terra no seu movimento de translação completa um período em cerca de 365 dias ou um ano. Esse movimento anual em torno do Sol descreve uma trajetória elíptica, cujo eixo imaginário da Terra apresenta uma inclinação de $23^{\circ}27'$ em relação ao plano de sua órbita (MAGNOLI e ARAÚJO, 2005).

As condições de insolação em determinado ponto da superfície da Terra varia de acordo com a época do ano, o que caracteriza a existência das estações do ano. Na figura 1 é possível observar a distribuição da insolação média anual na superfície terrestre.

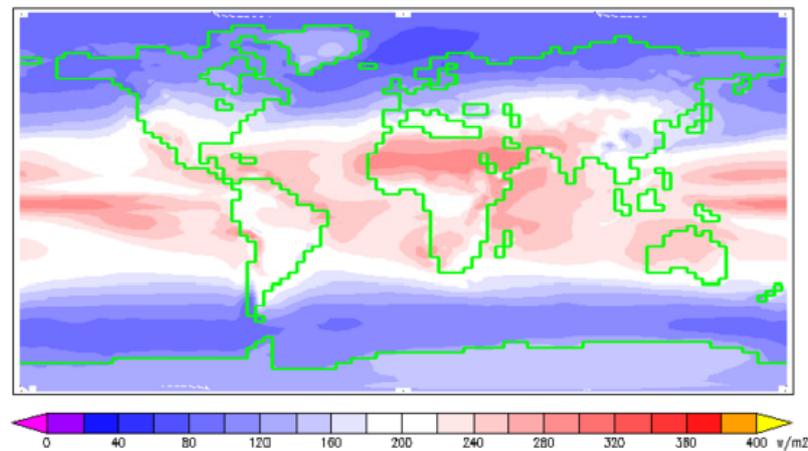


Figura 1: Insolação média anual na superfície terrestre.

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Insolation.png>

O planeta Terra gira diariamente em torno de um eixo imaginário, conhecido como movimento de rotação. A trajetória do Sol de Leste a Oeste varia conforme as estações do ano em virtude da mudança do ângulo de inclinação do eixo da Terra. Na figura 2 podem ser observadas as diferentes trajetórias descritas pela Terra em torno do Sol ao longo de um ano.

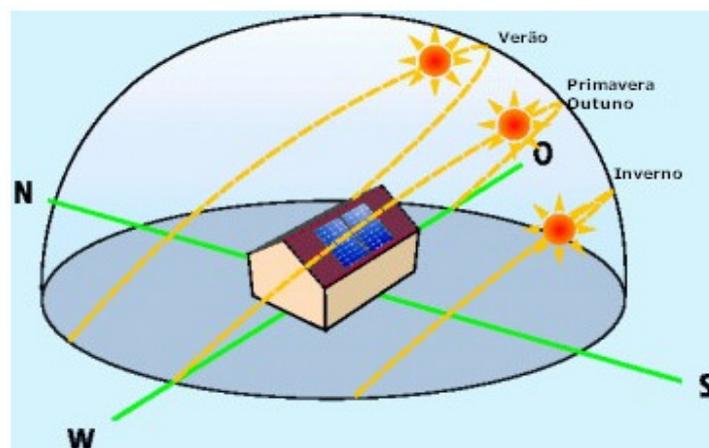


Figura 2: Movimento do sol ao longo das estações.

Fonte: <http://www.electronica-pt.com/content/view/273/>

Como pode ser visto na figura 2, a cada estação do ano o Sol nasce, a Leste, em uma posição diferente. Para assegurar melhor aproveitamento da geração solar fotovoltaica, as orientações dos painéis fixos são feitas voltadas para o Azimute Sul (hemisfério Norte) e Azimute Norte (hemisfério Sul) com inclinação em torno da latitude geográfica do local da instalação, visando à busca da maior captação solar ao longo do ano (CRUZ, 2012).

2.2.1 Ângulos da geometria solar

Do movimento aparente do Sol, ilustrado na figura 3, correspondente a metade do dia solar, ao longo do ano, verifica-se que o ângulo entre os seus raios e o plano do Equador varia entre $+23,45^\circ$ em torno do dia 21 de Junho (solstício de inverno no hemisfério Sul), e $-23,45^\circ$ em 21 de Dezembro (solstício de verão no hemisfério Sul). Este ângulo é denominado Declinação Solar (PINHO e GALDINO, 2014).



Figura 3: Plano elíptico da órbita da Terra.

A diferença entre a declinação e a latitude determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra. O ângulo de declinação solar pode ser calculada pela equação (2.1), em que “d” representa o dia juliano.

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left[-\text{sen}(23,45^\circ) \cos \left[\left(\frac{360}{365,25} \right) (d + 10) \right] \right] \quad (2.1)$$

O posicionamento do Sol em relação à superfície terrestre é caracterizado por ângulos que surgem devido à geometria entre os raios solares. Saber a posição do Sol em relação a um ponto situado na Terra é importante uma vez que permite determinar a variação anual do número de horas de sol num dia, ou seja, a variação do fotoperíodo. Também é possível

determinar a intensidade da radiação solar que atinge a Terra, bem como permite prever o comprimento da direção da sombra de determinado corpo.

Um conceito muito importante sobre sistemas de coordenadas celestes é o de hora oficial e hora solar. A hora oficial consiste na hora dada pela faixa delimitada de 15° de determinado fuso horário. A hora solar é a hora verdadeira e sua medida leva em consideração o meio dia solar.

Para a correção do fuso horário local convencionou-se adotar o Meridiano de Greenwich como referência de longitude 0°. Dessa forma através do LSTM (*Local Standard Time Meridian*) é feita essa compensação, ΔT_{GTM} é a diferença do fuso local e o fuso de referência do meridiano de Greenwich, de acordo com (2.2).

$$LSTM = 15^\circ \times \Delta T_{GTM} \quad (2.2)$$

Para a conversão da hora oficial em hora solar considera-se a compensação do fuso horário local e uma correção relacionada com o plano da órbita e a excentricidade da órbita dada pela Equação do Tempo (EOT), em (2.3).

$$EOT = 0,258 \times \cos \Omega - 7,416 \times \sin \Omega - 3,648 \times \cos 2\Omega - 9,228 \times \sin 2\Omega \quad (2.3)$$

O ângulo Ω é dado em graus e esta em função do dia do ano “n”, de acordo com (2.4).

$$\Omega = \frac{360 \times (n - 1)}{365,25} \quad (2.4)$$

A diferença entre a hora solar e hora oficial é calculada para compensar as variações que surgem dentro do mesmo fuso horário.

$$\text{Hora solar} - \text{Hora oficial} = 4 \times (\text{Longitude} - LSTM) + EOT \quad (2.5)$$

A diferença de longitudes é multiplicada por 4 para converter seus valores em graus para o tempo em minutos.

A hora solar é encontrada isolando seu termo da equação (2.5), ou seja, o valor em horas é dado por:

$$\text{Hora solar} = \text{Hora oficial} + [4x(\text{Longitude} - \text{LSTM}) + \text{EOT}] / 60 \quad (2.6)$$

Determinada a hora solar é possível determinar o Ângulo Horário (ω) que consiste no ângulo que os raios incidentes fazem no plano da Terra ao longo de um dia no sentido Leste-Oeste. Por convenção adotou-se ângulo zero no meio dia solar, $\omega=0^\circ$. Valores positivos de ângulos no período da manhã e negativos no período da tarde. A equação (2.7) é utilizada para o cálculo do Ângulo Horário (ω).

$$\omega = (\text{Hora solar} - 12) \times 15^\circ \quad (2.7)$$

O azimute (γ) é o ângulo medido sobre o horizonte, formado entre o eixo Norte-Sul, com origem no norte geográfico, e a direção da projeção do Sol no plano do horizonte local. O azimute varia entre 0° e 360° , sendo positivo, de 0° a 180° , quando a projeção se encontrar a leste do sul geográfico e negativo, de 0° a 180° , quando se encontrar a oeste. O ângulo referente à altura solar (α) é o ângulo medido sobre o círculo vertical do Sol, com origem no horizonte e extremidade no Sol. A altura varia entre 0° e $+90^\circ$. O complemento do ângulo da altura solar é conhecido como ângulo zenital (θ_z). O ângulo zenital é medido sobre o círculo vertical do Sol, com origem no zênite e extremidade na posição do Sol na esfera celeste. O ângulo zenital varia entre 0° e 180° , para seu cálculo utiliza-se a equação (2.8), que compõe as contribuições dos ângulos de declinação solar (δ), latitude do local (φ) e o Ângulo Horário (ω).

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin\varphi \times \sin\delta + \cos\varphi \times \cos\delta \times \cos\omega) \quad (2.8)$$

O ângulo azimutal (γ_s) varia conforme a trajetória do sol ao longo de um dia, de Leste a Oeste, devido ao movimento de rotação da Terra.

$$\gamma_s = \cos^{-1} \left[\frac{(\text{sen}\varphi \times \cos \theta_z - \text{sen}\delta)}{(\cos \varphi \times \text{sen}\theta_z)} \right] \quad (2.9)$$

O ângulo de altitude (α) varia conforme a trajetória da Terra no movimento de translação ao redor do Sol.

$$\alpha = \text{sen}^{-1} [\text{sen}\delta \times \text{sen}\varphi + \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \omega] \quad (2.10)$$

Na figura 4 são ilustrados os ângulos para posicionamento solar.

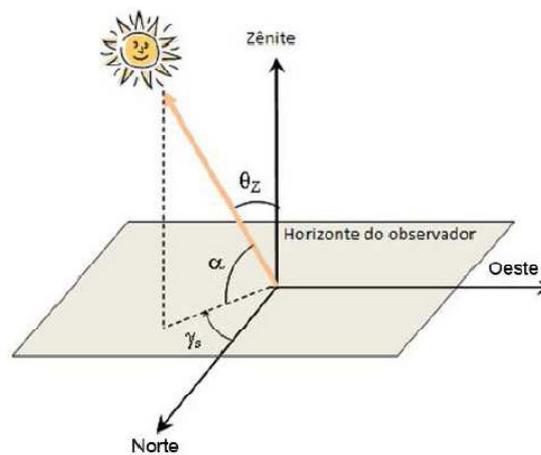


Figura 4: Ângulos para posicionamento solar.

Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Capítulo 3 - Metodologia e desenvolvimento

Pretende-se com este capítulo apresentar os métodos e materiais utilizados na elaboração dessa monografia. Para realizar um estudo comparativo dos sistemas fotovoltaicos fixo e móvel foi adotada uma metodologia que consiste em analisar o local de instalação dos painéis, o projeto, construção e instalação do protótipo do rastreador proposto, bem como as análises conseguidas com esse sistema.

3.1 Instalações da Usina Solar Fotovoltaica da UFJF

A Usina Solar Fotovoltaica de Juiz de Fora, também denominado de Laboratório Solar Fotovoltaico da UFJF (LABSOLAR) foi construída com recursos da FINEP, oriundos do edital CT-Infra de 2001. Apresenta capacidade instalada de 31,68 kWp (quilo-watt-pico) produzida a partir de 264 painéis fotovoltaicos de 120Wp cada, agrupados em 11 arranjos independentes. Em 2010, com o apoio financeiro do INERGE (INCT de Energia Elétrica) foram adquiridos três conversores CC-CA monofásicos, 5 kW cada, que possibilitam a geração contínua de eletricidade durante o período diurno. Estes conversores são conectados em delta e injetam até 15 kW de potência na rede elétrica da universidade. Um sistema supervisor possibilita monitorar a geração diária de energia (Laboratório Solar da UFJF, 2015).

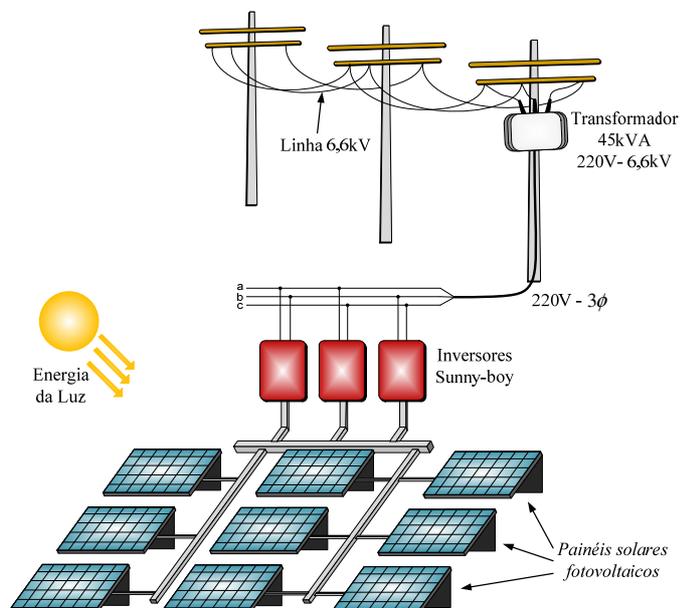


Figura 5: Usina Solar Fotovoltaica da UFJF.

Fonte: Almeida (2011)

3.2 Local de instalação

A escolha do local de instalação da estrutura mecânica do sistema de posicionamento automático de painel solar é um aspecto importante no sentido de evitar sombreamento. Foi utilizado o software Sketchup da empresa Google. Uma maquete digital em escala foi feita para o Laboratório Solar Fotovoltaico, que pode ser observado na figura 6. Nessa maquete destacam-se as construções do Instituto de Artes e Designer (IAD) o Anfiteatro do Prédio Engenheiro Itamar Franco, bem como os arranjos de painéis do laboratório.

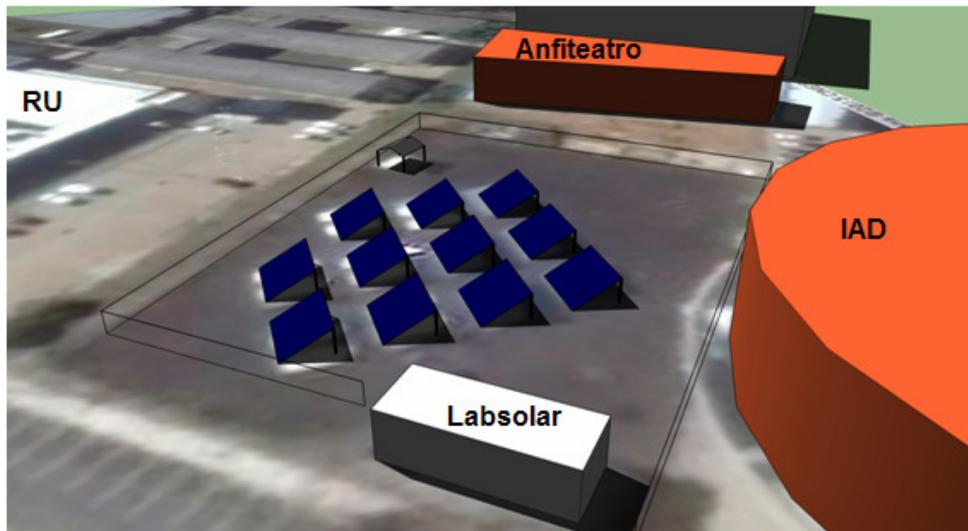


Figura 6: Maquete da Usina Solar da UFJF.

O presente software permite visualizar o sombreamento provocado pelas construções vizinhas ao laboratório, em diferentes horários do dia e estações do ano. Com base nas informações obtidas foi possível obter um local mais apropriado para a instalação do rastreador. Na figura 7 está indicado a posição em “1” como o melhor local para a instalação.

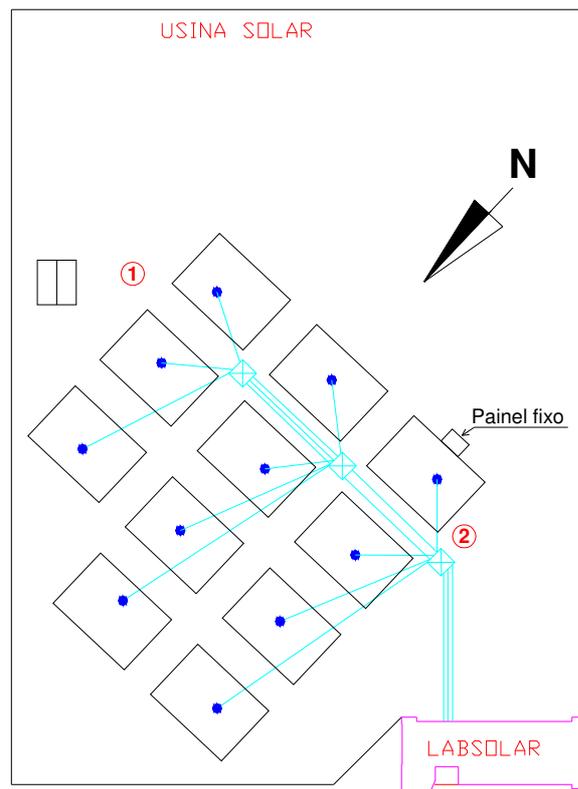


Figura 7: Planta baixa da Usina Solar da UFJF.

Uma segunda opção para instalação indicada em “2” na figura 7 foi proposta, uma vez que a posição em “1” está bem afastada do laboratório local onde será instalado o sistema de aquisição de dados. O segundo local também foi escolhido por estar próximo do local de instalação do painel fixo, conforme figura 7. Para verificar a influência do sombreamento no local de instalação em “2” foi analisada a projeção estereográfica do local. O diagrama é representado em duas dimensões, sendo que no eixo horizontal se representa os valores de azimute e no eixo vertical o valor da elevação solar. Nesse tipo de projeção, os ângulos da posição solar estão previstos para diferentes horas do dia e o mesmo permite analisar as perdas por sombreamento. As construções do prédio do Laboratório Solar Fotovoltaico e do IAD são os obstáculos que mais influenciam no sombreamento no novo local de instalação. Desta forma, para obter o perfil dos obstáculos será preciso determinar a orientação Norte-Sul do local. Depois será preciso obter o ângulo de elevação (altura) bem como o azimute do obstáculo a partir do qual se projetará a sombra desde o centro do local de instalação. Na figura 8 temos um demonstrativo de como obter o perfil do obstáculo.

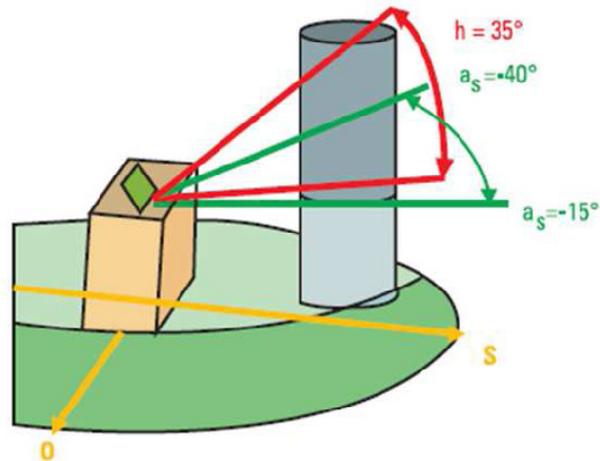


Figura 8: Obtenção do perfil dos obstáculos.

Para o prédio do Laboratório temos o ângulo de azimute do obstáculo partindo do Sul para o Oeste de -98° a -148° , elevação de aproximadamente 20° , conforme a altura do prédio e distância do local. Para o prédio do IAD temos o ângulo de azimute do obstáculo partindo do Sul para o Oeste de 0° a -83° elevação de aproximadamente 41° , conforme a altura e distância do local.

O diagrama da projeção estereográfica foi elaborado para o local de estudo através do software Sun Path Chart Program (University of Oregon , 2016), desenvolvido pelo Solar Radiation Monitoring Laboratory da Universidade de Oregon. As medidas de elevação e azimutes dos obstáculos foram transferidas para a projeção, conforme ilustrado na figura 9.

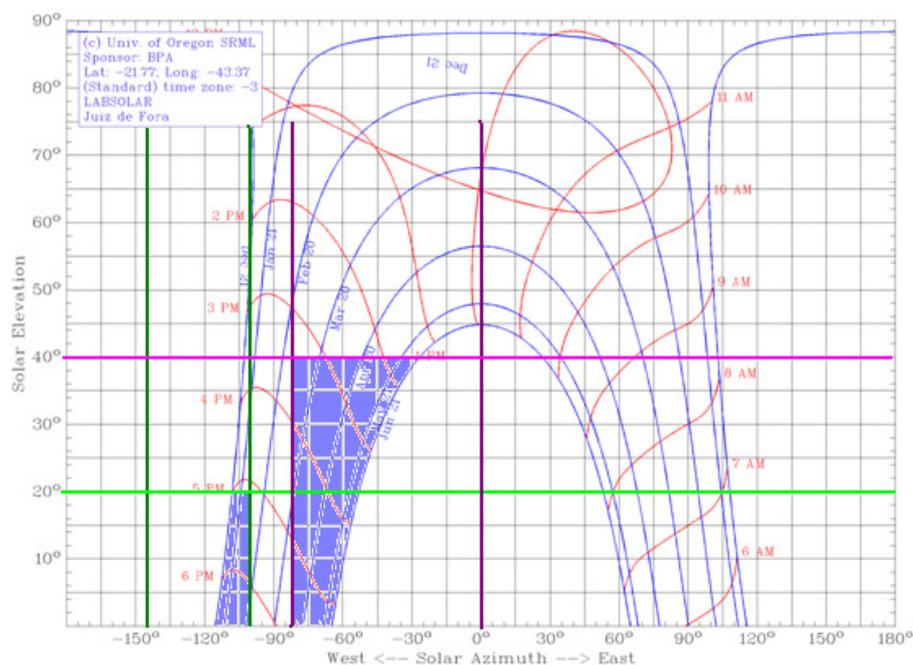


Figura 9: Projeção estereográfica do local com os sombreamentos previstos.

A região em roxo do diagrama compreende os sombreamentos presentes no local de instalação para as horas do dia ao longo dos meses do ano. Nela é possível perceber que em virtude do prédio do IAD ser alto e estar bem próximo do laboratório o local de instalação terá problemas de sombreamento durante os meses de Março a Junho no intervalo entre 15 e 17 horas. O prédio do Laboratório apresentou sombreamento, porém somente a partir das 17 horas durante os meses de Dezembro a Janeiro.

3.3 Orientação dos painéis

Para sistemas fixos, como o Laboratório Solar da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, existe uma alternativa para melhoria de geração elétrica que consiste no ajuste manual dos ângulos de inclinação dos painéis fotovoltaicos. Esse ajuste é feito nos solstícios de Inverno e nos solstícios de Verão, períodos esses em que os raios do Sol estão mais afastados da linha do equador. Para esse ajuste, foi utilizado um software desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul chamado Radiasol 2, ilustrado na figura 10. Esse software permite obter características de radiação para determinadas regiões do Brasil, bem como o ângulo de inclinação ideal para instalação dos painéis solares (LABSOL - UFRGS, 2016).

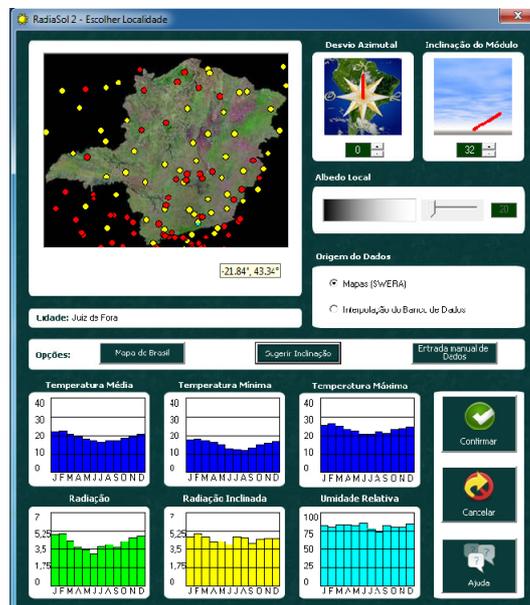


Figura 10: Tela do Software Radiasol 2.0.

Juiz de fora está situada na latitude de $21^{\circ}45'$ sul e longitude de $43^{\circ}21'$ leste. Pelos dados fornecidos pelo software a inclinação de 32° privilegia a geração nos meses de Inverno. A inclinação de 11° privilegia a geração nos meses de Verão. Testes também foram feitos para inclinação de 23° . As inclinações de 11 e 23° foram simuladas, pois os arranjos de painéis solares fotovoltaicos que fazem parte do Laboratório Solar Fotovoltaico possuem furação

permitindo a orientação dos painéis nestas angulações. Simulações utilizando este programa foram realizadas para as inclinações de 32°, 23° e também 11° conforme pode ser observado na figura 11.

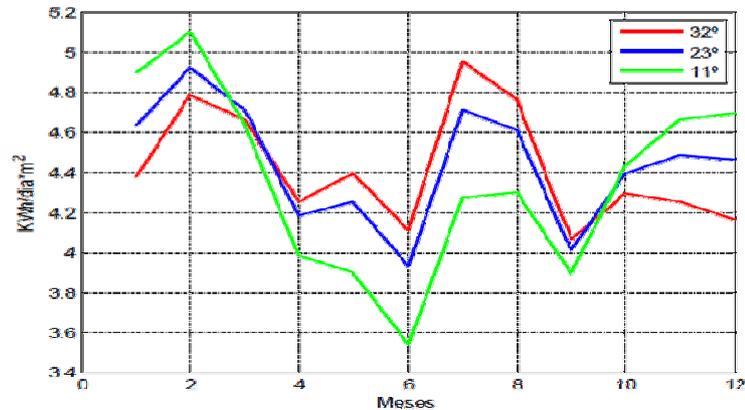


Figura 11 - Variação da radiação de acordo com a inclinação dos painéis fotovoltaicos.

Com base nessas informações de ângulos importantes para a região considerada, partimos para um estudo de um sistema de posicionamento automático de painéis fotovoltaicos como uma alternativa de melhorar essas condições de inclinação para superar os problemas de eficiência na geração de eletricidade.

A estrutura desenvolvida consiste num rastreador solar do tipo azimutal de dois eixos. Sua escolha foi devido à possibilidade de ajuste do posicionamento do painel para os ângulos de inclinação e de azimute. Segundo Lira (2014), rastreadores solares do tipo azimutal são mais adequados para regiões onde a latitude é distante da linha do equador. A cidade de Juiz de Fora possui latitude de 21°45' Sul e longitude de 43°21' Leste, distante por sua vez da linha do equador. Na figura 12 é apresentada a carta solar da cidade de Juiz de Fora apresentando as diferentes trajetórias do Sol ao longo de um ano.

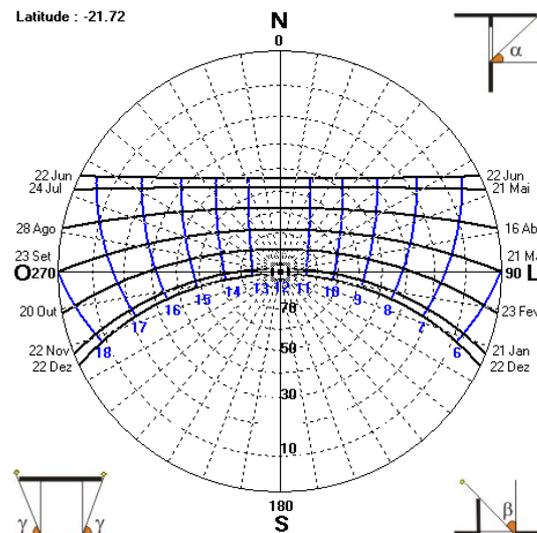


Figura 12: Carta solar de Juiz de Fora.

Fonte: Programa SOL-AR

Na carta solar mostrada na figura 12 é possível perceber que a maior inclinação solar acontece no dia 22 de Dezembro. Nesse dia a inclinação possui uma variação de aproximadamente 47° na direção Norte-Sul. Também na figura 12, é percebido que nos dias de 21 de Maio a 22 de Junho não existe variação significativa na inclinação solar, fazendo com que o rastreador opere com apenas um eixo no sentido Leste-Oeste. Sendo assim, o uso de um rastreador que acompanhe a trajetória do Sol ao longo do dia será mais adequado às condições na cidade de Juiz de Fora.

3.4 Descrição do protótipo

A estrutura escolhida foi a do tipo azimutal com fixação através de uma estrutura com pedestal. Essa estrutura mecânica permite o movimento do painel, para corrigir sua posição em dois graus de liberdade. Na figura 13 é mostrado o esboço da estrutura do rastreador solar azimutal de dois eixos, desenhada no software Sketchup proposta nesse trabalho. A estrutura mecânica foi montada no local escolhido, como pode ser visualizada na figura 14.

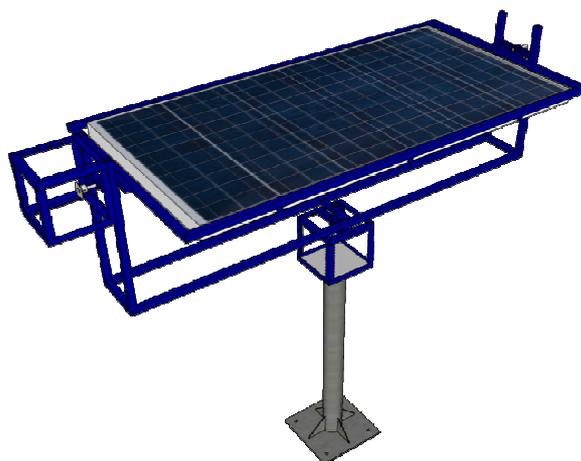


Figura 13: Projeto da estrutura azimutal de dois eixos.



Figura 14: Estrutura mecânica para posicionamento automático de um painel solar fotovoltaico.

Essa estrutura permite posicionar o painel solar fotovoltaico para que o mesmo sempre seja posicionado perpendicularmente aos raios solares, de modo a corrigir a sua posição em relação ao movimento aparente do Sol. Sua construção foi pensada de maneira a possibilitar o movimento nos dois eixos em questão, a saber, o movimento azimutal responsável pela correção do movimento vertical e o movimento de inclinação responsável pela correção do movimento horizontal. Na figura 15 é possível verificar o mecanismo, composto pelo motor de corrente contínua e engrenagens responsáveis por esses movimentos. Um potenciômetro é

acoplado ao eixo para fins de leitura da posição do motor. Mas especificamente, o potenciômetro é usado com um divisor de tensão resistivo que fornece uma tensão proporcional à posição angular da estrutura. Na figura 16 é possível visualizar os componentes descritos.

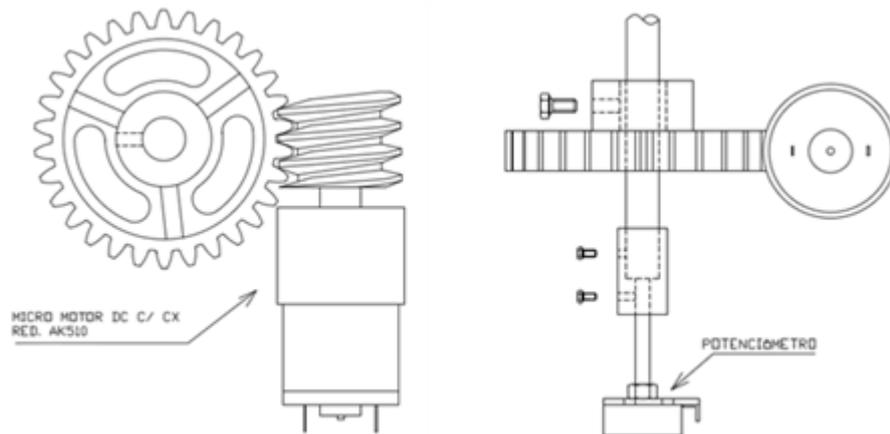


Figura 15: Mecanismo do movimento azimutal e de inclinação.



Figura 16: Detalhe da montagem do mecanismo do movimento azimutal e de inclinação.

Nessa estrutura mecânica foram utilizados diversos tipos de materiais tais como metalon, perfis de barra chata, cantoneiras, chapas galvanizadas, eixos, rolamentos, engrenagens, pedestal e suporte de inclinação de parabólicas e outros componentes menores como parafusos, arruelas, porcas. O custo dos materiais utilizados na montagem, bem como

mão de obra foi de R\$ 187,00, os componentes elétricos da montagem foi de R\$ 451,28, totalizando R\$ 638,28 e contou com apoio financeiro do Departamento de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia da UFJF.

3.4.1 Motores de corrente contínua

Responsável pela correção do movimento do painel nos dois movimentos comentados, esses motores são especificados quanto a sua tensão de alimentação, corrente de armadura e principalmente conjugado. Os motores escolhidos foram os da empresa Akiyama Motors e seu modelo é AK510, ilustrado na figura 17.



Figura 17: Micro redutor DC AK510 c/ caixa de redução.

Fonte: (Neoyama, 2016)

A escolha desses motores baseou-se no fato de que há a necessidade do motor apresentar um alto torque para movimentar toda a massa da estrutura. As especificações técnicas do fabricante estão descritas na tabela 1.

Tabela 1: Especificações técnicas motoredutor AK510.

Tensão	Sem carga		Máximo rendimento				Partida	
nominal	RPM	I(mA)	RPM	I(mA)	Kgf.cm	P(W)	I(A)	Kgf.cm
12 V	3	20	2,7	150	15	3,7	4,4	45

[fonte: www.neoyama.com.br]

3.4.2 Engrenagens

O mecanismo de acionamento dos eixos da estrutura é composto de engrenagens, conforme mostrado nas figuras 15 e 16. Esse mecanismo foi idealizado para correção de dois problemas no movimento de rotação dos eixos. A primeira solução diz respeito ao conjugado, pois nessa configuração de engrenagens do tipo rosca sem-fim e engrenagens de dentes retos é possível obter um conjugado mais elevado, e reduzir o esforço nos motores elétricos para manter a estrutura em repouso. A segunda solução se refere à instalação do potenciômetro, com esta configuração é possível o acoplamento de um potenciômetro no eixo do movimento possibilitando por sua vez uma referência de posição do painel. No projeto foram utilizados

engrenagens de alumínio empregadas em máquinas de assar frango. Essas engrenagens foram escolhidas devido a sua facilidade de aquisição bem como seu preço. Uma foto dessas engrenagens é mostrada na figura 18.



Figura 18: Engrenagens de máquinas de assar frango.

3.4.3 Painel solar fotovoltaico

O painel utilizado foi o BPSX120U, fabricado pela empresa BPSolar. O painel policristalino é constituído de 72 células em série. Suas características elétricas, para condição de radiação solar de 1000 W/m^2 a uma temperatura ambiente de 25° C , são: Potência máxima de 120 W; Corrente máxima de pico de 3,56 A; Tensão máxima de pico de 33,7 V; Corrente de curto-circuito de 3,87 A; Tensão de circuito aberto de 42,1 V. Na figura 19 é ilustrado um esboço do painel fotovoltaico BPSX120U.

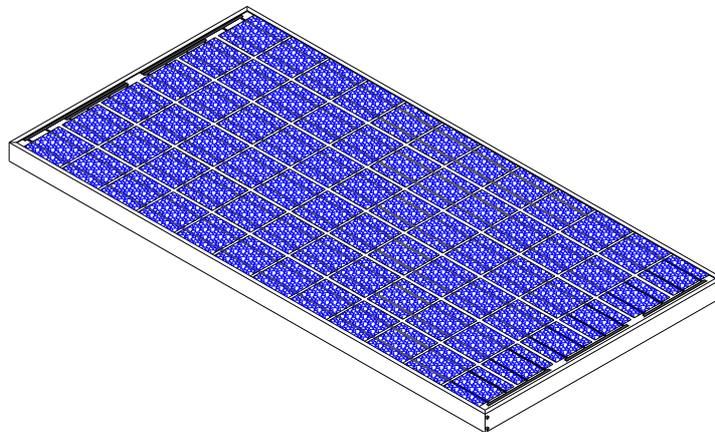


Figura 19: Módulo Fotovoltaico BPSX120U.

Fonte: (DATASHEET - BPSX120)

3.4.4 Placa driver

Para o acionamento dos motores foi utilizado o circuito integrado L298N, fabricado pela empresa *STMicroelectronics*, que consiste essencialmente em duas estruturas de conversor em ponte completa, usualmente conhecidas como ponte H. Este componente mostrou ser bem interessante para esta aplicação, pois ele permite o acionamento dos dois

motores e também possibilita uma interface com o circuito de controle. Na figura 20 temos seu encapsulamento, bem como seus respectivos pinos.

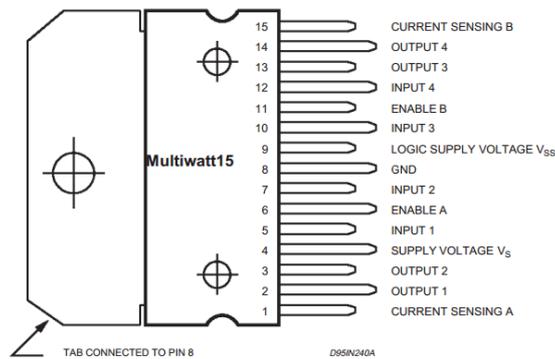


Figura 20: Driver L298N.

Fonte: (DATASHEET - L298N)

O CI L298N opera segundo uma lógica de controle para o acionamento dos seus interruptores. Seus níveis lógicos são de tecnologia TTL e para cada saída é necessário a habilitação de três pinos de controle. Na figura 21 é mostrado o desenho esquemático da estrutura interna do CI L298N.

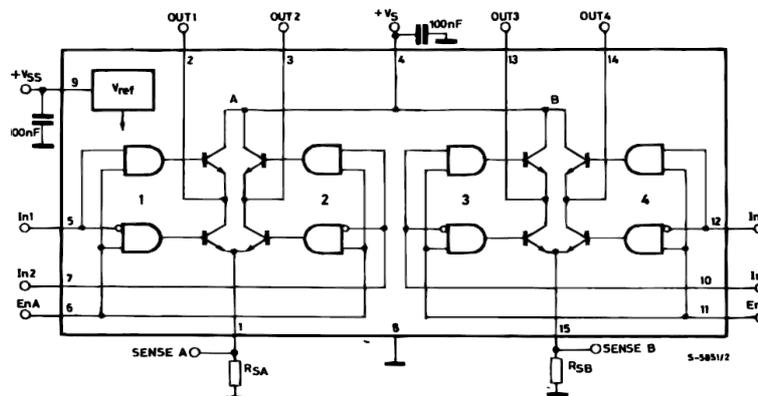


Figura 21: Diagrama de blocos do L298N.

Fonte: (DATASHEET - L298N)

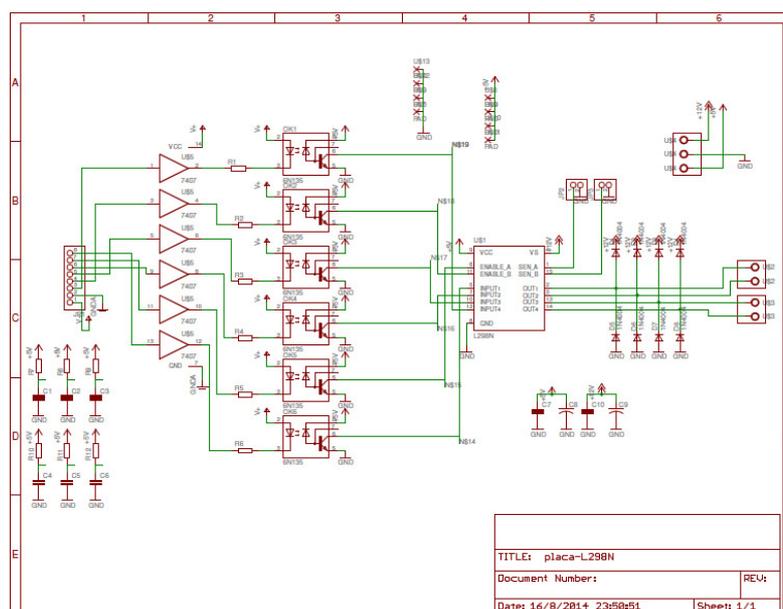
Dois desses pinos, designados por In1 e In2, são responsáveis por controlar o sentido de giro do motor. O pino designado por EnA é responsável por ligar ou desligar o motor. Na tabela 2, temos o esquema para o controle bidirecional do motor.

Tabela 2: Controle bidirecional de motor.

Entradas		Função
EnA = H	In1 = H ; In2 = L	Sentido direto
	In1 = L ; In2 = H	Sentido reverso
	In1 = In2	Rápida parada do motor
EnA = L	In1 = X ; In2 = X	Motor parado

Legenda: H = nível lógico alto; L = nível lógico baixo; X = don't care

Para possibilitar uma interface com o circuito de controle, foi preciso desenvolver um circuito para a comunicação com o mesmo. Desta forma o circuito foi pensado como uma forma de isolar o circuito de potência dos motores do circuito de controle do microcontrolador. Para tal foi desenvolvido um esquemático, conforme a figura 22 para esse circuito. Nesse circuito foi utilizado um driver composto de seis buffer's, circuito integrado SN7407, componente esse responsável por adequar as condições de corrente do circuito controlador com o circuito de interface. Esse componente é responsável por acionar os optoacopladores correspondentes, optoacoplador 6N135, componente esse responsável por isolar os dois circuitos mencionados. Dessa forma, o circuito montado tem como entradas os seis sinais de controle para habilitação e tem como saída os bornes para a ligação dos motores. O circuito é alimentado com tensões de 12V para os motores e 5 V para o circuito de controle do L298N e lado receptor (fotodiodo) do 6N135 e 5V para o CI SN7407 e lado transmissor (Led) do 6N135.

**Figura 22: Esquemático do circuito desenvolvido.**

O esquemático foi desenvolvido com o software Eagle 5.11.0, versão estudante que possibilita a confecção de placas com tamanho máximo de placa de 80 x 100 mm. A placa foi confeccionada na plotter LPKF S63 no Laboratório de Eletrônica (LABEL) da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFJF. O PCB desenvolvido e a placa montada com os componentes são mostrados na figura 23.

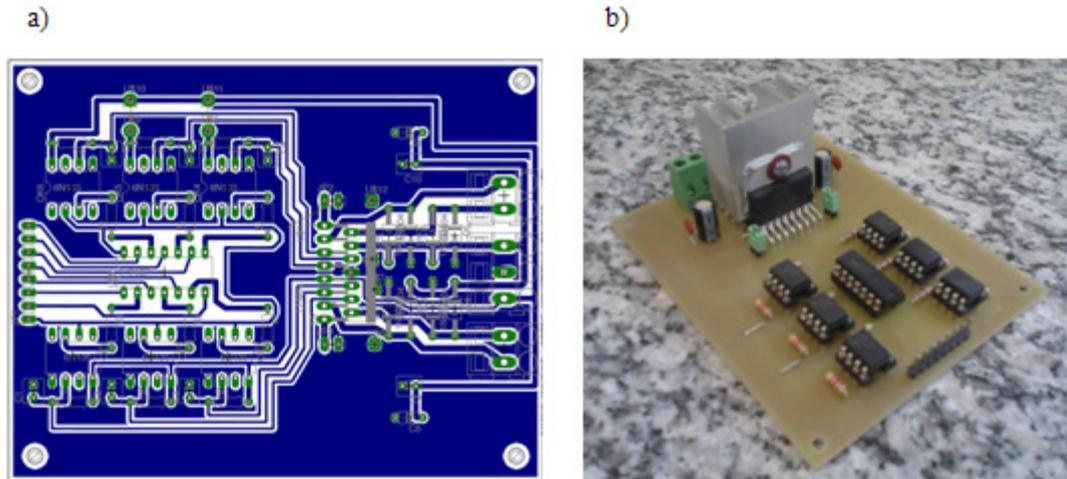


Figura 23: a) Esquemático do PCB; b) Placa montada.

3.4.5 Microcontrolador

Para o sistema de controle foi utilizado um kit didático próprio para sistemas embarcados que consiste no kit Arduino Mega, mostrado na figura 24. O kit é composto por um microcontrolador ATmega2560 e possui 54 pinos digitais I/O e 16 entradas analógicas. O Arduino foi escolhido pela sua facilidade tanto na programação, bem como sua praticidade de gravação.

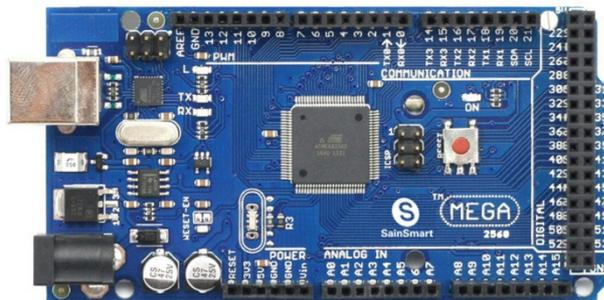


Figura 24: Kit Arduino Mega 2560.

Fonte: (FilipeFlop, 2016)

3.5 Carga dos sistemas

Para efeito de comparação dos sistemas fixo e móvel, em termos de energia gerada, foram construídos dois conversores abaixadores de tensão (“*buck*”), que interconectam cada painel solar a uma bateria eletroquímica de chumbo ácido de 12 V e capacidade de 60 Ah.

Esta topologia possibilita implementar o algoritmo de rastreamento de máxima potência (MPPT, do inglês “*Maximum Power Peak Tracking*”), ou seja, além de alcançar a máxima eficiência pelo posicionamento dos painéis, também se busca que estes painéis trabalhem no ponto de maior transferência de energia. Na figura 25 é mostrada a topologia do conversor, incluindo os circuitos para medição de corrente e de tensão.

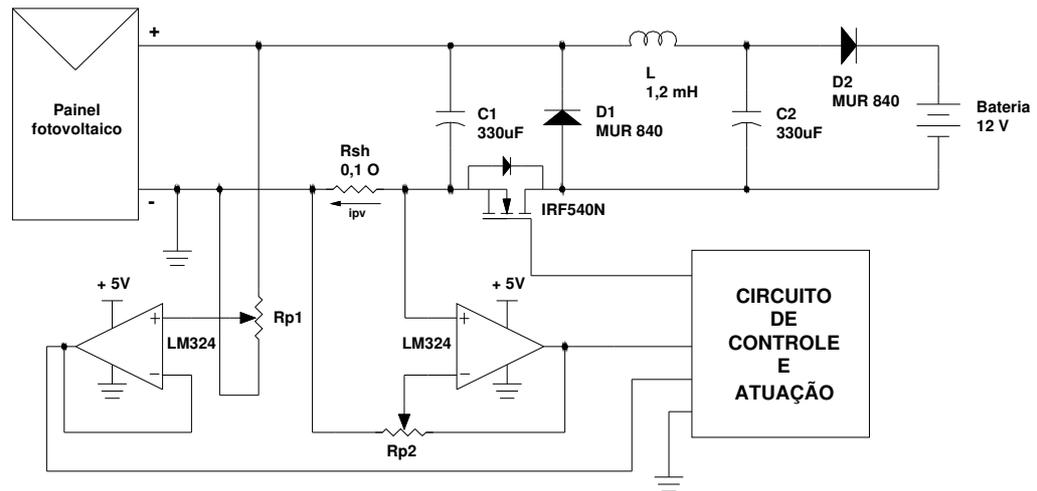


Figura 25: Esquemático do circuito conversor abaixador de tensão.

Existem diversos métodos descritos na literatura para implementar o algoritmo de busca do ponto de máxima potência. Os mais utilizados consistem nas técnicas de Pertuba e Observa (P&O) e Condutância Incremental (IC). Lobato (2015) fez uma análise comparativa entre as duas técnicas e verificou um rendimento muito próximo. Esse trabalho não teve o objetivo de realizar um estudo das diversas técnicas disponíveis para o MPPT e sim utilizar uma delas como alternativa para simular as condições de carga para os dois sistemas.

O algoritmo utilizado para o controle dos conversores foi o baseado na técnica Pertuba e Observa. O algoritmo P&O é uma técnica de simples compreensão, fácil implementação e boa eficiência na aplicação de sistemas de geração solar fotovoltaico. O fluxograma do algoritmo utilizado é ilustrado na figura 26.

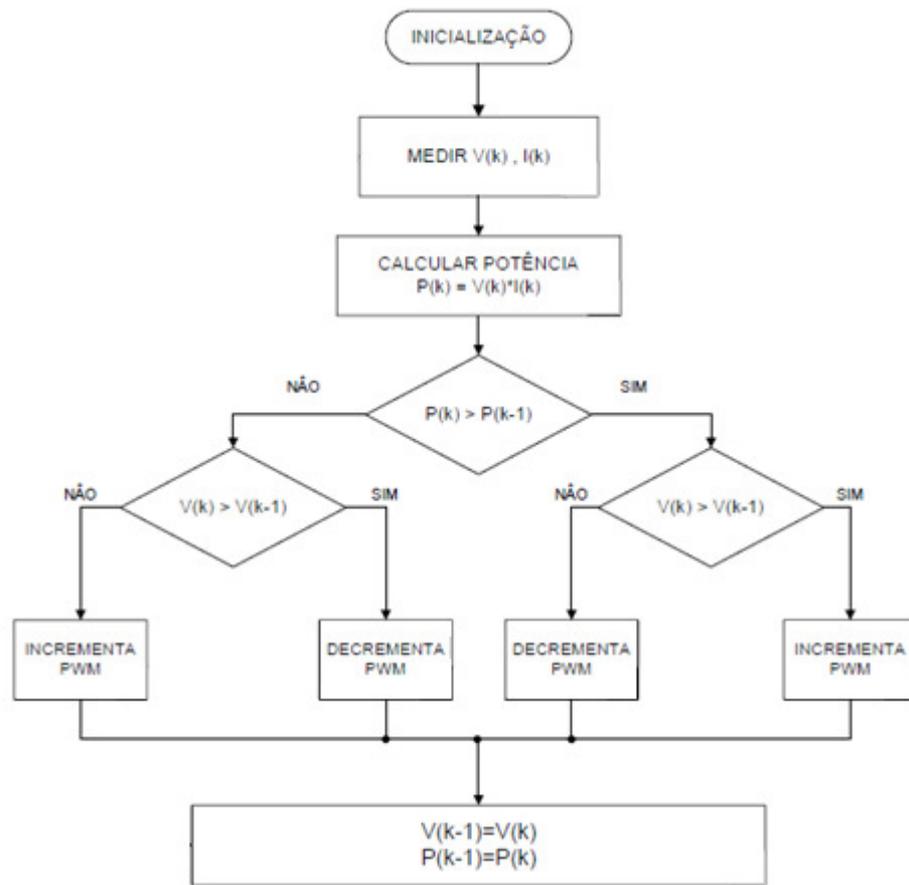


Figura 26: Fluxograma do algoritmo P&O.

A implementação do controle do conversor abaixador de tensão e do algoritmo MPPT foram realizadas em um microcontrolador da família PIC. Nele foi gravado um algoritmo onde o ciclo de trabalho do Mosfet IRF540N, presente no conversor buck, é variado para controlar o ponto de máxima potência. Dessa forma, o algoritmo de P&O faz com que o ciclo de trabalho fique variando em valores próximos ao MPP.

3.6 Calibração do sistema de posicionamento automático

Conforme descrito previamente o sistema de movimento dos dois eixos do protótipo tem como objetivo posicionar corretamente o painel perpendicularmente aos raios de Sol. O correto posicionamento é conseguido através de uma referência de posição dado pelo potenciômetro instalado em cada eixo. Entretanto essa referência muda a cada período de tempo devido ao movimento de rotação da Terra. Assim é fundamental utilizar dados matemáticos de coordenadas geográficas do local em estudo, tais como azimutes e elevação para acompanhar o movimento solar. Para essa concepção foi desenvolvido um algoritmo em linguagem de programação aceito pelo microcontrolador Atmega do kit de desenvolvimento Arduino. Esse programa possibilita obter diretamente dados de ângulos de azimutes, ou seja,

ângulos para movimentos verticais do painel, e ângulos de inclinação, ou seja, ângulos para movimentos horizontais do painel. Com esses dados é possível prever a correta orientação do painel de acordo com o período do dia e ano, tendo como parâmetros de entrada os dados de latitude e longitude do local em estudo.

O programa desenvolvido é capaz de calcular esses ângulos comparar com o valor lido da referência do potenciômetro e dessa forma interpretá-los posicionando os respectivos motores para as posições indicadas. Para a referência de posição foi preciso realizar a calibração dos potenciômetros, uma vez que o Arduino faz uma leitura na sua entrada analógica que corresponde a um nível de tensão e o programa faz o cálculo da posição do Sol informando um valor em graus. A calibração foi feita colocando um esboço de um transferidor com retas radiais graduado em graus que variam de 10 em 10 graus. Um nível de bolha também foi utilizado para verificar as posições de 0, 45 e 90 graus. A figura 27 mostra o método utilizado para calibração dos eixos.



Figura 27: Método para calibração dos eixos em graus.

O procedimento para ajuste dos ângulos dos eixos consistiu em verificar a leitura dos potenciômetros para uma variação de 10 graus. Desta forma, com os valores lidos, foi utilizada uma função de interpolação no Arduino para mapear esses ângulos.

3.6.1 Curva de posição e velocidade da estrutura

Com a calibração dos eixos de posição da estrutura foi realizado um experimento para levantar a curva de posição e de velocidade. Para esse levantamento um programa no Processing foi escrito em linguagem Java para a geração das curvas. Nas figuras 28 e 29 estão esboçadas as curvas experimentais de posição do eixo e de velocidade de giro para uma variação em degrau de 12 V aplicados aos terminais do motor. É possível constatar que o eixo girou 45° em um intervalo de aproximadamente 90 segundos. A curva de velocidade é obtida indiretamente a partir da curva de posição, uma vez que as amostras são coletadas em intervalos de tempo fixo e não se dispõe de um sensor de velocidade na estrutura.

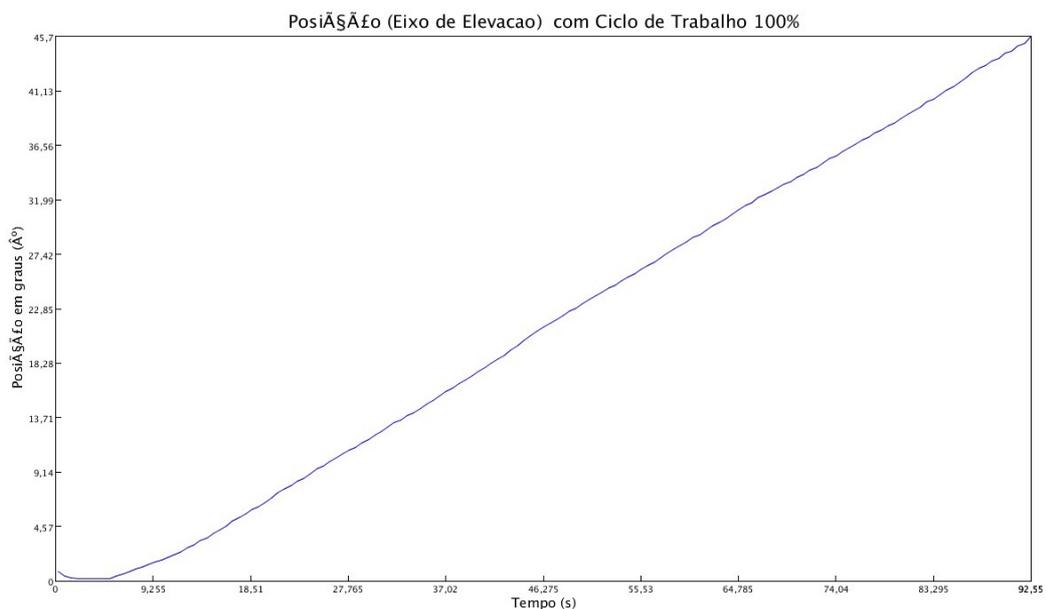


Figura 28: Curva de posição do eixo de elevação.

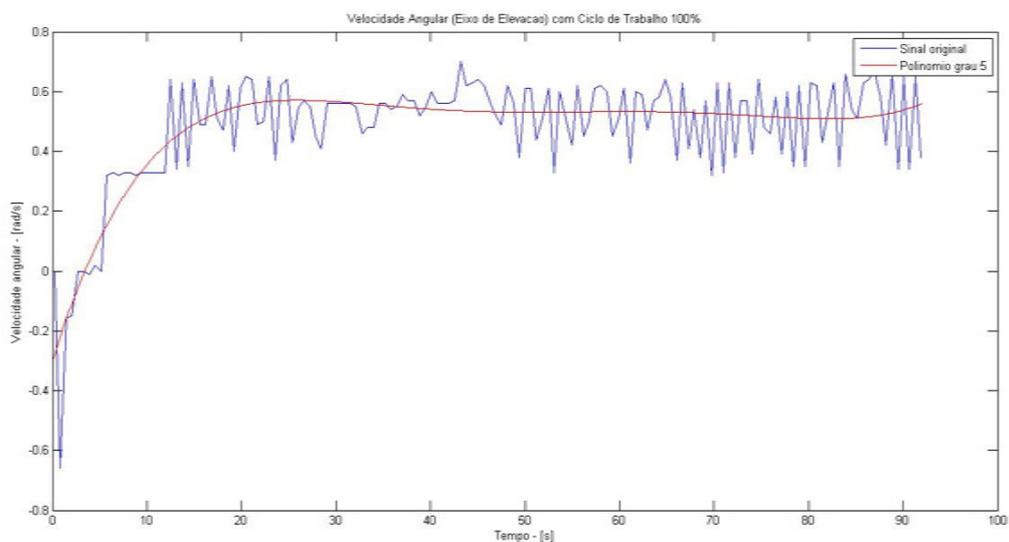


Figura 29: Curva de velocidade do eixo de elevação.

A velocidade do eixo do motor é de 3 rpm ($\sim 0,314$ rad/s), enquanto que a do eixo da estrutura é de aproximadamente 0,00977 rad/s. A relação de engrenagens é de aproximadamente 32:1.

3.7 Metodologia

Os dois painéis foram instalados próximos um do outro, para fins de assegurar condições similares de irradiação, temperatura ambiente, vento e umidade relativa do ar. Nos sistemas fixo, mostrado na figura 30, a inclinação é tomada como referência a latitude do local, que em Juiz de fora é de aproximadamente 21° .



Figura 30: Inclinação do painel fixo.

Para monitorar o sistema foram identificadas duas possíveis alternativas. A primeira proposta consistia levar todo o cabeamento necessário à medição das grandezas para o local do laboratório, mas exigia fios de comprimento longo e suscetíveis a ruído. A segunda proposta, que foi a adotada, consistia em monitorar no local de medição e transmitir os dados via comunicação serial até o laboratório. Para executar esta tarefa foi empregado o Arduino UNO, que processava as informações enviadas pelo outro Arduino responsável pelo controle do sistema de posicionamento automático e também transferir os dados para um computador com o sistema supervisorio. Cabe destacar novamente que o Arduino Mega 2560, utilizado no controle do sistema de posicionamento, apresenta as seguintes funcionalidades: monitorar os dados de posição dos eixos (adquiridos a partir do sinal de tensão do divisor de tensão dos potenciômetros), tensão e corrente no painel, temperatura de superfície do painel, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, horário atual (relógio RTC – “*Real Time Clock*”); determinar a posição em que o painel deverá se encontrar; controlar o motor para ajustar a posição dos eixos do painel.

O sistema supervisorio utilizado consistiu numa interface própria para comunicação serial desenvolvida pela empresa Parallax. O software PLX-DAQ desenvolvido pela empresa é disponível gratuitamente através do site <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>. Esse

software permite coletar os dados lidos pelo Arduino e armazenar os mesmos em uma planilha do Excel.

Foi realizado um breve estudo para identificar qual o melhor intervalo tempo para ajustar a posição do painel móvel. Foi considerado o deslocamento, em graus, entre o movimento da Terra dado pela sua rotação em relação à posição do Sol, durante o intervalo de 1 hora. Sabe-se que a Terra é dividida em 24 faixas horárias (fusos horários) e que cada faixa corresponde a 15° . O intervalo tempo deve satisfazer às condições de trajetória do movimento Terra-Sol para reduzir o consumo de energia pelos motores. Nos testes feitos, foi constatado que o intervalo de tempo de 3 minutos foi o mais adequado, ou seja, o sistema de posicionamento deverá ser acionado 20 vezes a cada hora. A confirmação da perpendicularidade foi realizada através de observações visuais e a estratégia adotada foi utilizar uma pequena haste fixada na superfície do painel, perpendicular a mesma. O painel está posicionado corretamente para o Sol quando não existe nenhuma sombra no entorno da haste. Esta medida mostrou ser eficiente e aplicável para a proposta analisada, conforme mostrado na figura 31.

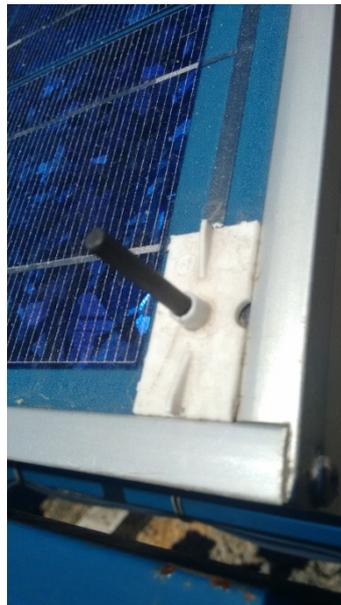


Figura 31: haste para verificação da perpendicularidade dos raios incidentes do Sol.

Capítulo 4 – Análise de resultados

Este capítulo tem como objetivo verificar os resultados conseguidos com o sistema de posicionamento automático do painel solar fotovoltaico, através do protótipo feito, em comparação com o sistema fixo. Desta forma a metodologia para coleta de dados foi realizada adotando dois painéis idênticos, do fabricante BPSolar, de silício policristalino com 120 Wp modelo BPSX120U.

3.8 Características do painel solar

Os módulos utilizados são compostos de 72 células de silício policristalino ligadas em série. Esses módulos apresentam os mesmos parâmetros elétricos, ou seja, potência máxima de pico, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão e corrente no ponto de máxima potência (MPP) que é fornecida para as condições padrões de funcionamento conhecidas como STC (*Standard Test Condition*). Considerando radiação em 1000 W/m², temperatura na célula de 25 °C, bem como condições de distribuição espectral AM=1,5, as características elétricas do painel utilizado estão descritas na tabela 3.

Tabela 3: Características elétricas do painel BPSX120U.

Características elétricas	
Potência máxima de pico (P_{MAX})	120 W
Tensão de máxima potência (V_{MPP})	33,7 V
Corrente de máxima potência (I_{MPP})	3,56 A
Potência mínima garantida (P_{MIN})	110 W
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	3,87 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	42,1 V
Coefficiente de temperatura para I_{SC}	(0.065±0.015)%/°C
Coefficiente de temperatura para V_{OC}	-(160±10)mV/°C
Efeito aproximado da temperatura na potência	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	47±2°C

Com base nas informações contidas na tabela 3, bem como o modelo matemático do painel fotovoltaico, descrita por Almeida (2011) as curvas características do comportamento elétrico do painel em função de diferentes condições de radiação, em uma temperatura do painel de 25°C, estão esboçadas nas figuras 32 e 33. É possível constatar a importância que o painel esteja trabalhando no ponto de máxima potência para assegurar maior produção de eletricidade para diferentes condições de irradiação solar.

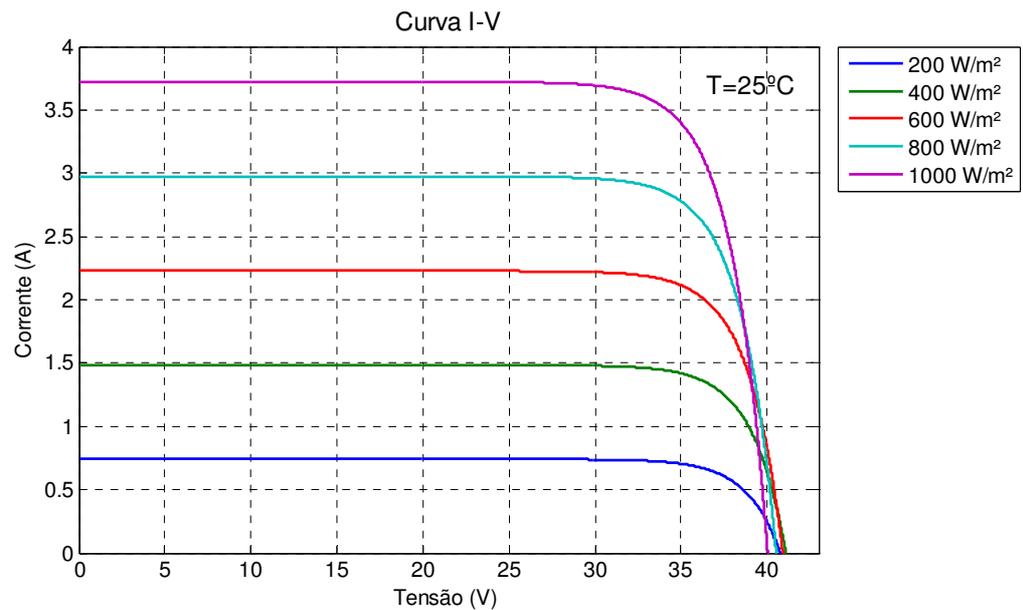


Figura 32: Curvas de corrente versus tensão para diferentes condições de irradiação.

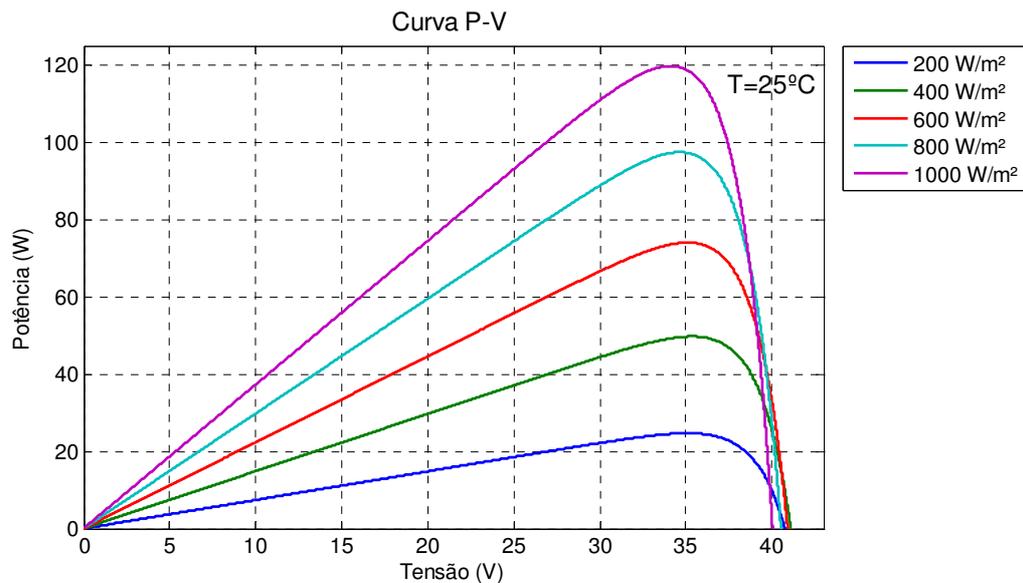


Figura 33: Curvas de potência versus tensão para diferentes condições de irradiação.

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado pela intensidade luminosa dada pela irradiação e pela temperatura das células. O aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo reduza, deslocando para a esquerda do ponto de operação, da curva I-V, a máxima potência gerada, figura 34 e figura 35.

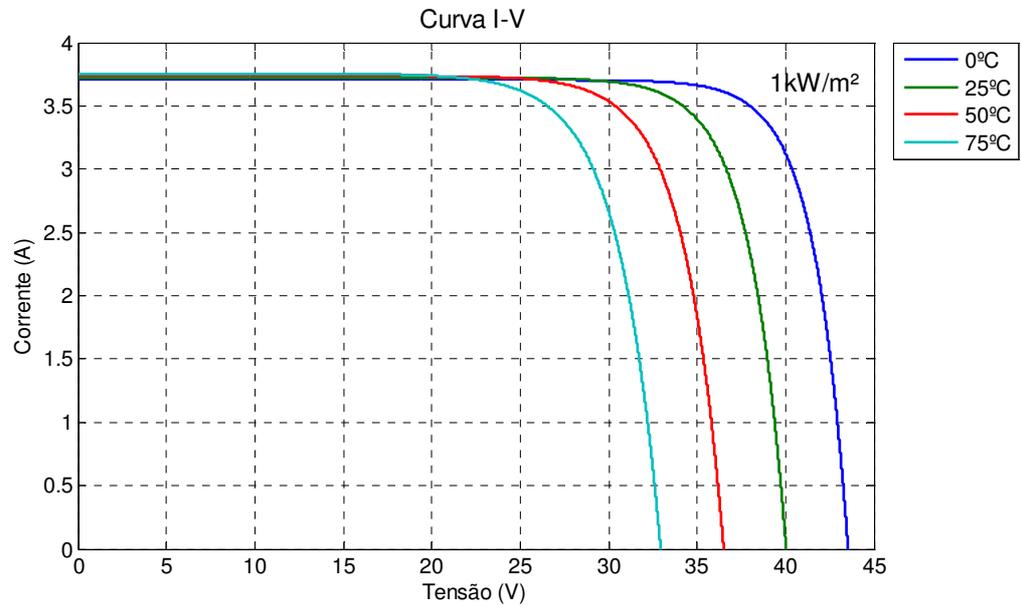


Figura 34: Curvas de corrente versus tensão para diferentes condições de temperatura.

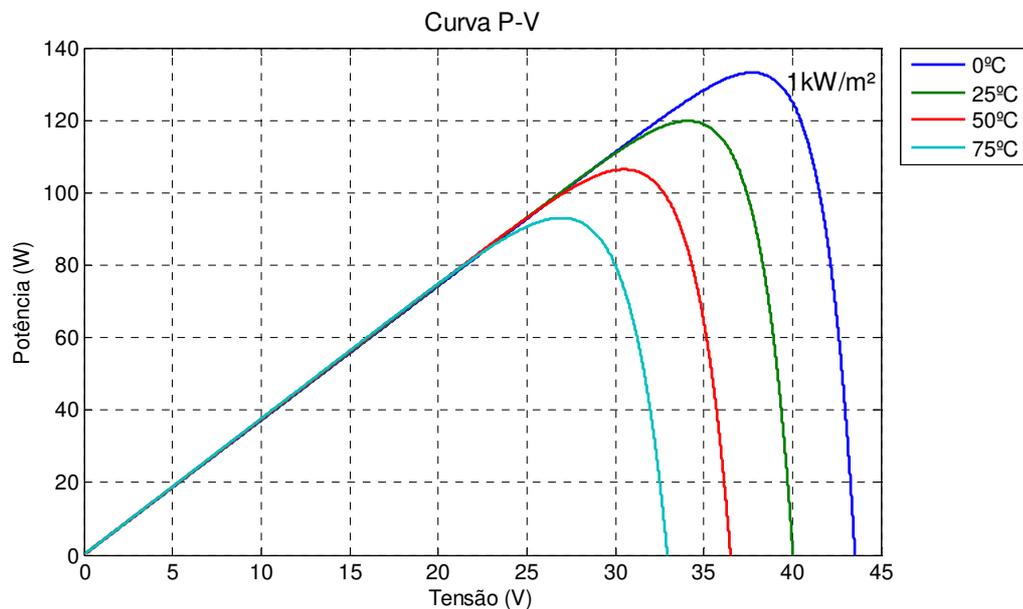


Figura 35: Curvas de potência versus tensão para diferentes condições de temperatura.

3.9 Resultados experimentais

A coleta de dados dos sistemas teve início no mês de Julho de 2016. O sistema supervisor foi ajustado para atualizar os dados de medição a cada intervalo de tempo de 2 segundos. Em 13 de Julho de 2016, no período entre 10h58min e 17h00min, foram obtidas as curvas mostradas na figura 36.

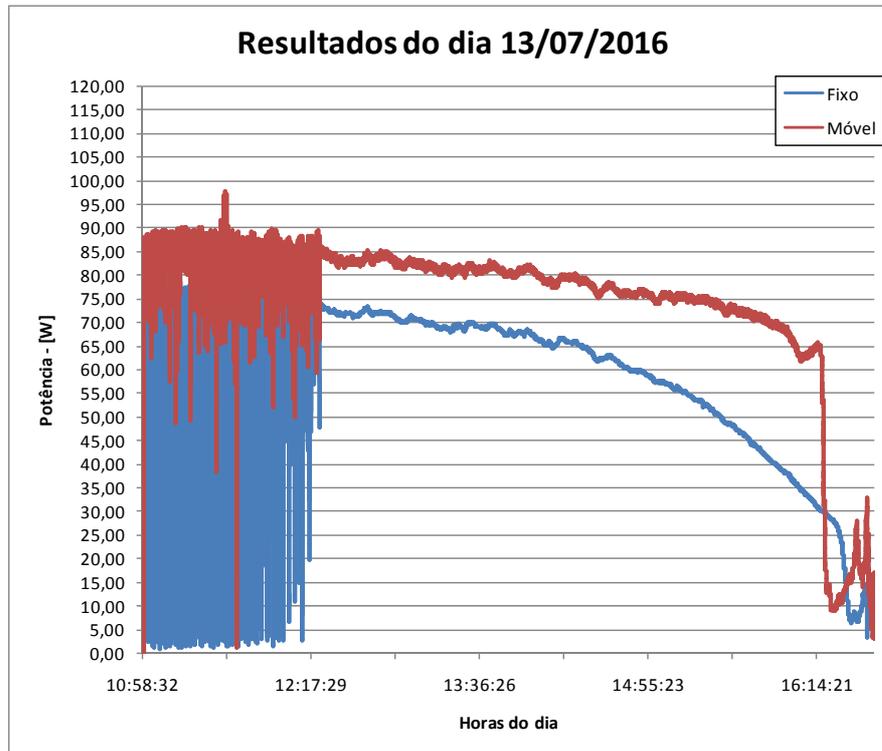


Figura 36: Curva de potência fornecida pelos sistemas com controle MPPT.

É possível verificar que no intervalo entre 10h58min e 12h17min, o algoritmo MPPT não funcionou adequadamente. E ainda, a partir das 16 horas e 14 minutos houve uma brusca diminuição da potência gerada pelo painel móvel. Na figura 37 é possível perceber que o fato não pode ser explicado pela radiação incidente e nem por nebulosidade uma vez que o céu esteve limpo durante todo o período da manhã e parte da tarde. Também é possível perceber que durante o intervalo de tempo em que o sistema funcionou adequadamente, a produção de eletricidade foi significativamente maior no sistema de painel móvel.

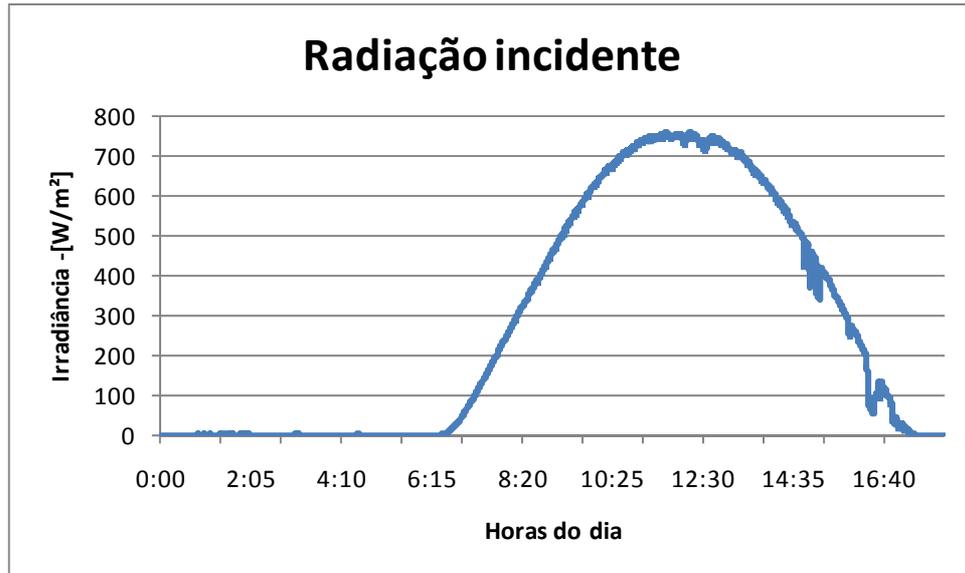


Figura 37: Radiação incidente do dia 13/07/2016.

Na tabela 4 estão descritos os resultados da energia gerada, no intervalo entre 12h17min e 16h41min, para os dois sistemas. O painel fixo gerou 0,3 kWh enquanto o painel móvel gerou 0,39 kWh resultando em um ganho do sistema de posicionamento de 30 % na geração de energia em comparação com o sistema fixo.

Tabela 4: Comparação da energia gerada pelos dois sistemas dia 13/07/2016.

Sistema	Energia (kWh)
Fixo	0,30
Móvel	0,39

Nos dias seguintes, novos experimentos foram realizados, entretanto esse mesmo comportamento repetiu algumas vezes. Uma vez que não se conseguiu ajustar adequadamente o algoritmo MPPT em tempo hábil para cumprir o prazo de defesa da monografia, uma nova coleta de dados foi realizada e o novo experimento consistiu em colocar duas cargas resistivas idênticas para os dois painéis. As cargas escolhidas foram dois reostatos de bancada, com resistência de 22 Ω e corrente máxima de 4,4 A. O valor da resistência ajustado no reostato para esse experimento foi de 9 Ω . Um segundo resultado foi conseguido no dia 27 de Julho de 2016. Na figura 38 é possível visualizar as curvas de potência gerada pelos dois sistemas, entre 00h00min e 17h00min.

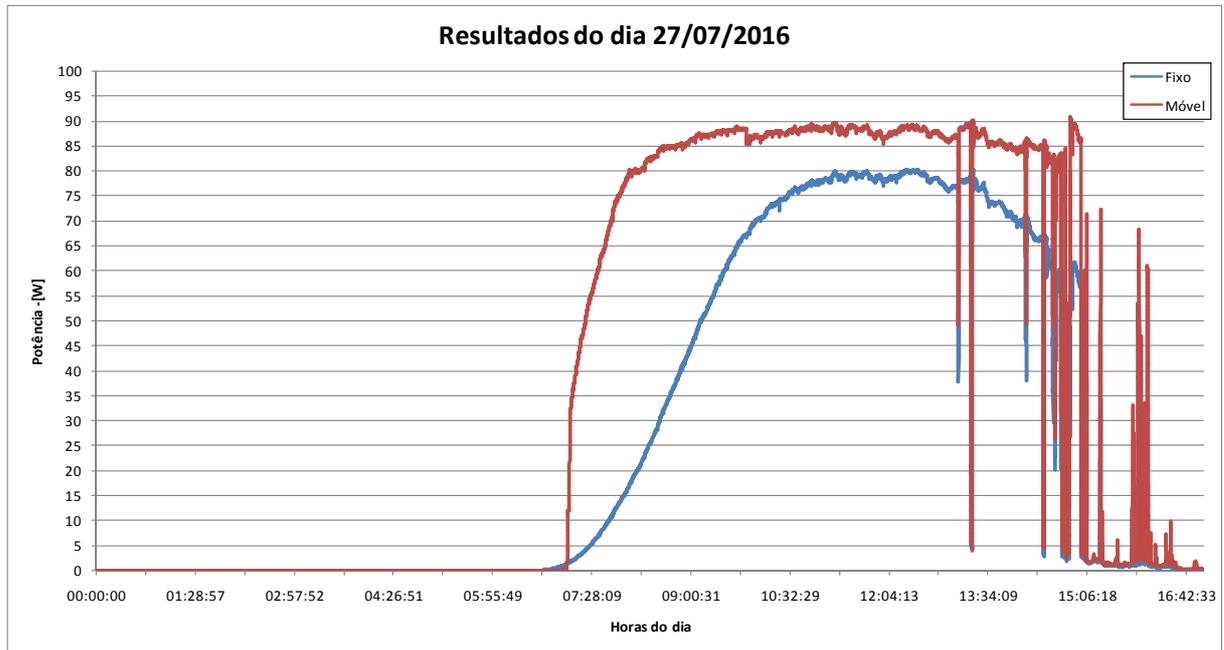


Figura 38: Curva de potência fornecida pelos sistemas com cargas fixas.

É possível perceber o comportamento esperado dos dois sistemas. Houve intervalos com variações bruscas de potência fornecida entre 14h00min e 17h00min, mas esse fato pode ser explicado pela nebulosidade que aconteceu nesse período, conforme pode ser verificado na figura 39.

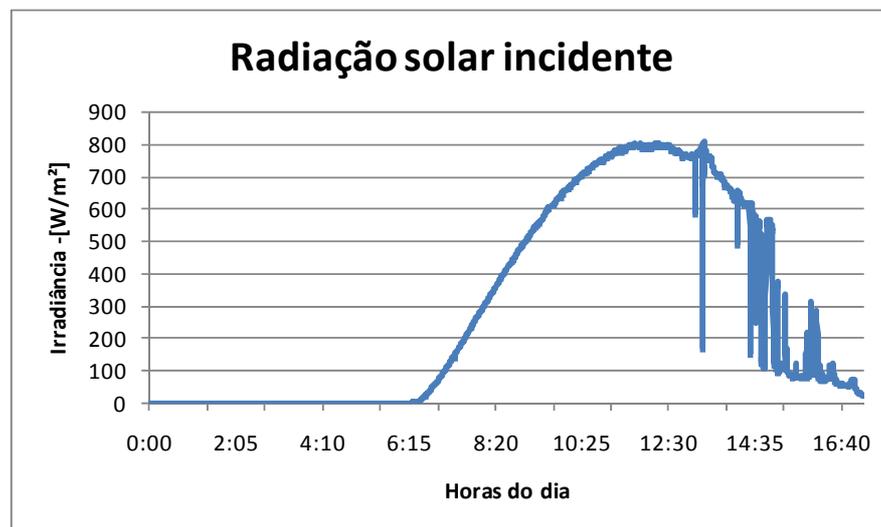


Figura 39: Radiação incidente do dia 27/07/2016.

Uma vez que os painéis estão conectados diretamente à carga resistiva, o conversor abaixador de tensão não está conectado e, por consequência, o algoritmo MPPT não está funcionando nesta situação. Em outras palavras, o painel solar está operando fora do ponto de máxima potência.

Na tabela 4 estão descritos os resultados da energia gerada, ao longo do dia, para os dois sistemas. O painel fixo gerou 0,5 kWh, enquanto que o painel móvel gerou 0,69 kWh resultando em um ganho do sistema de posicionamento de 38% na geração de energia em comparação ao sistema fixo.

Tabela 5: Comparação da energia gerada pelos dois sistemas dia 27/07/2016.

Sistema	Energia (kWh)
Fixo	0,50
Móvel	0,69

Para verificar os resultados encontrados com os dados experimentais uma simulação foi proposta, com o código desenvolvido do modelo do painel. A simulação da energia conseguida com o sistema móvel foi realizada com o modelo descrito por Almeida (2011). A simulação teve como entradas dois vetores, a saber: um vetor com os dados de radiação e outro vetor com as temperaturas ambientes do dia do experimento. A curva da temperatura ambiente é mostrada na figura 40.

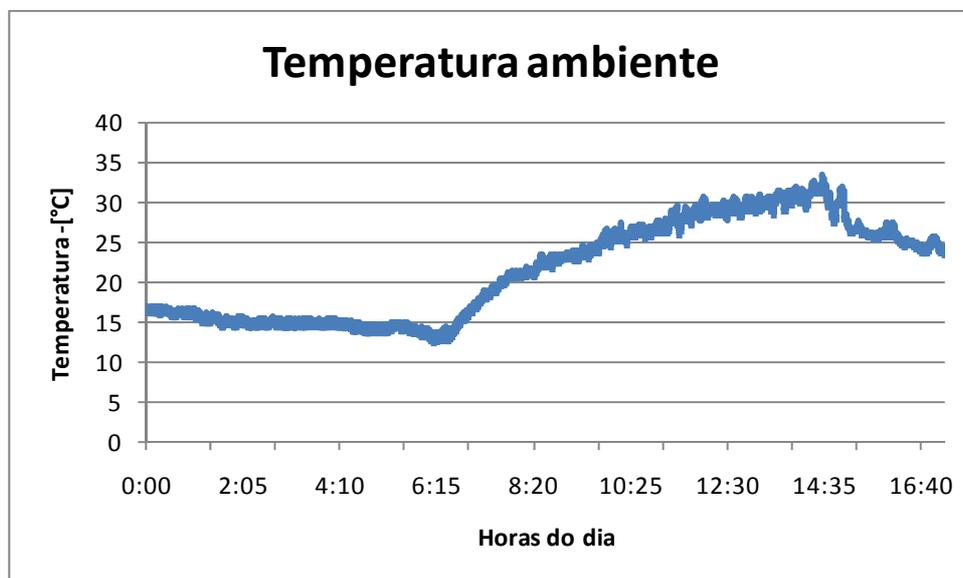


Figura 40: Curva da temperatura ambiente do dia 27/07/2016.

O procedimento de simulação consistiu, para cada dado de radiação e correspondente temperatura ambiente registrado, levantar a curva característica do painel. Dada a curva P-V do painel, registra-se num outro vetor a máxima potência conseguida. Integrando todos essas potências, com base no tempo de cada coleta, obtêm-se a máxima energia conseguida via simulação com os valores medidos em campo. Na tabela 6 estão descritos os valores de energia gerada pelo sistema de painel móvel e simulado. Esta variação permite formular

algumas hipóteses para justificar a diferença encontrada: imprecisão no modelo do painel, erros nas medidas de temperatura ambiente bem como radiação solar incidente.

Tabela 6: Comparação da energia gerada pelo sistema móvel experimental versus simulado.

Sistema	Energia (kWh)		Diferença (%)
	(experimental)	(simulado)	
Móvel	0,69	0,60	13,04

Com relação ao modelo uma verificação pode ser realizada comparando a curva de temperatura do painel para valores experimentais e de simulação. As curvas experimentais de temperatura dos painéis e temperatura ambiente foram traçadas e podem ser visualizadas na figura 41.

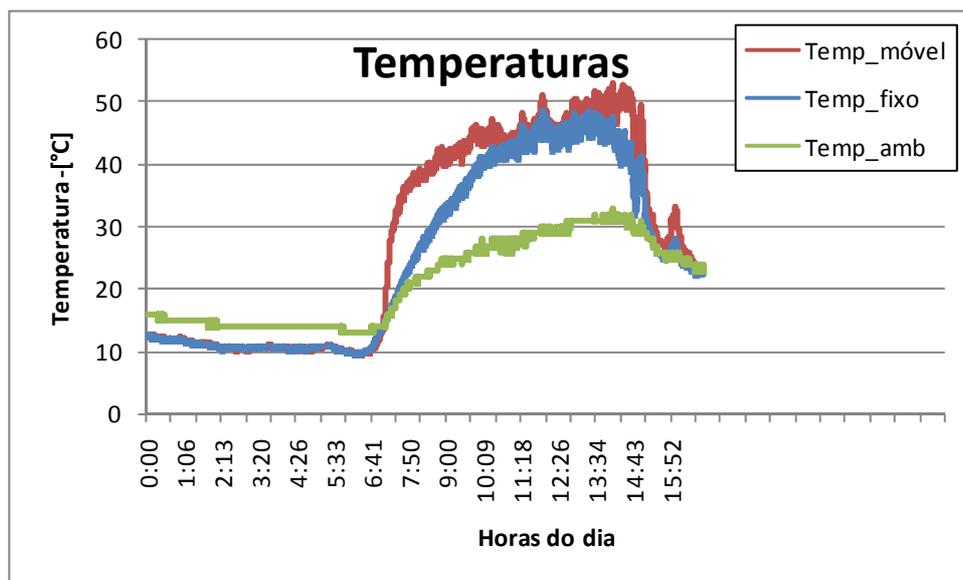


Figura 41: Curvas de temperatura ambiente e temperaturas dos painéis.

No modelo utilizado, para o cálculo da temperatura da célula via simulação leva-se em consideração a temperatura ambiente, a radiação solar incidente, bem como a temperatura nominal de operação da célula (NOCT). Na folha de dados do painel, cujos dados foram reproduzidos na tabela 3, NOCT é o referencial de temperatura da célula quando a mesma está em condições de funcionamento padrão, ou seja, a temperatura ambiente for de 20°C, irradiação solar de 0,8kW/m² e velocidade do vento de 1m/s. O NOCT do painel tem um valor de temperatura de aproximadamente 47°C. A fórmula para o cálculo da temperatura da célula é dada pela equação (4.1).

$$T_c = T_a + \frac{H_t}{800} (\text{NOCT} - 20) \quad (4.1)$$

Da equação, T_a é a temperatura ambiente, em °C, H_t é a radiação solar incidente, em W.m^{-2} , NOCT é a temperatura nominal de operação da célula, em °C. A curva experimental, bem como a simulada da temperatura do painel é visualizada na figura 42.

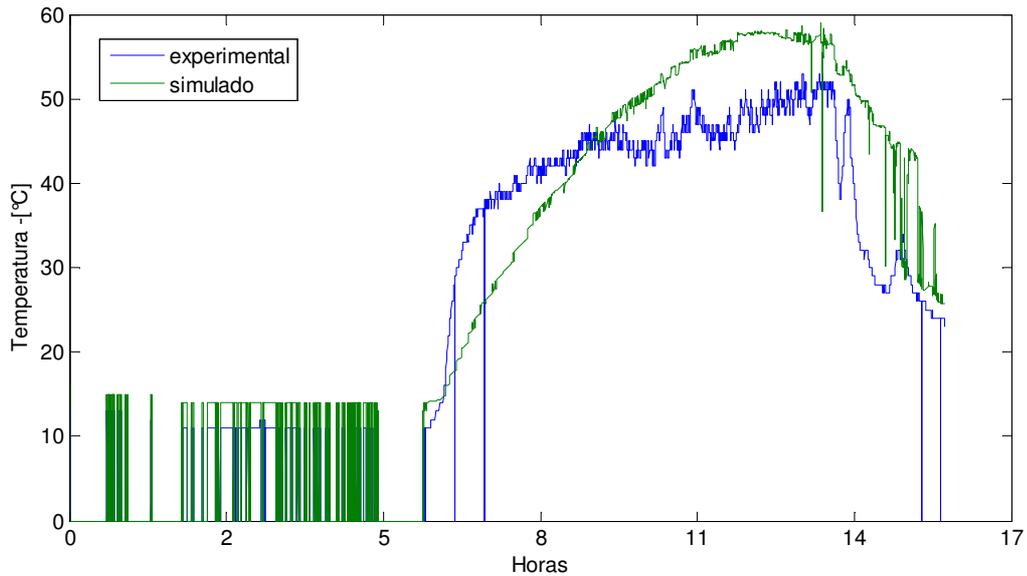


Figura 42: Curva da temperatura do painel experimental e simulada.

Há uma perceptível diferença entre as temperaturas do painel para dados experimentais e simulados. A temperatura máxima registrada na experimentação foi de 50°C, já a mesma temperatura máxima simulada foi superior aos 50°C. Dessa forma, é possível verificar a influência da temperatura na eficiência do painel fotovoltaico. Salvo os erros de leitura de temperaturas bem como radiação solar incidente que também interferem no cálculo da energia gerada pela simulação, é possível concluir que as discrepâncias de energia para dados experimentais e simulados deve-se ao efeito da temperatura do painel.

3.9.1 Consumo do sistema de posicionamento automático

Para uma melhor avaliação da eficiência do sistema como um todo é importante estimar o consumo de energia dos circuitos de controle e dos motores do sistema de posicionamento automático.

A tensão disponível para os circuitos é fornecida por uma fonte chaveada com tensões de 12 V e 5 V contínuas. Como a tensão dessa fonte é praticamente constante, não se julgou necessário fazer a medição. Para a aquisição da corrente de consumo foi utilizado um sensor de corrente do tipo Hall, mostrado na figura 43.

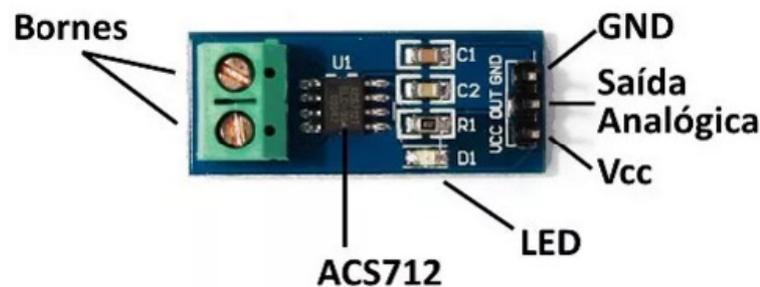


Figura 43: Sensor de corrente ACS712.

O circuito de controle dos motores exige tensões de 5 V para o acionamento da lógica e tensão de 12 V para a alimentação dos motores. Uma placa com regulador de 5 V foi desenvolvida para que a corrente de consumo do sistema fosse medida com a tensão de 12 V. O consumo dos motores segundo informações da folha de dados do fabricante, reproduzidas na tabela 1, para condição nominal de máximo rendimento é de 3,7 W. A corrente medida dos motores realizadas durante movimento dos mesmos, foi de aproximadamente 40 mA, por motor. O seu consumo é de aproximadamente 0,48 W, totalizando 0,96 W para os dois motores. A corrente medida de toda a lógica de controle, incluindo ponte H, microcontrolador Arduino, regulador de tensão, bem como todo circuito de sensoriamento utilizado foi de aproximadamente 160 mA, contínuos durante todo o tempo, contabilizando um consumo de 1,92 W.

Partindo da curva levantada de potência para o dia 27/07/2016, figura 38, é possível perceber que os motores começam a serem acionados a partir das 7 horas e deixam de funcionar às 17 horas, sendo atualizados de 3 em 3 minutos durante todo o dia. Para esse tempo de atualização foi constatado que os motores ficam ligados durante um tempo de aproximadamente 2 segundos. Em uma hora os motores são atualizados 20 vezes e ficam ligados durante 40 segundos. Na tabela 7 estão reproduzidos os consumos do controle e dos motores, bem como o consumo total do sistema de posicionamento automático.

Tabela 7: Consumo do sistema de posicionamento automático.

Tempo (h)		Consumo (Wh)		Consumo Total (Wh)
controle	motores	controle	motores	
17	10	32,64	0,106	32,75

Dado o consumo do sistema de posicionamento automático, uma possível avaliação da eficiência do sistema é estabelecida. Na tabela 5 estão descritos os resultados da energia gerada, ao longo do dia, para os dois sistemas. Retirando o consumo do sistema da energia gerada pelo painel móvel, temos uma geração líquida de 0,657 kWh resultando em um ganho do sistema de posicionamento de 31,4% na geração de energia em comparação ao sistema fixo.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido nessa monografia teve como principal objetivo desenvolver um protótipo mecânico de um sistema de posicionamento automático de um painel solar fotovoltaico. O trabalho apresenta uma proposta a um problema muito comum quando se refere à geração de energia elétrica fotovoltaica, que consiste no posicionamento de painéis solares fotovoltaicos em relação ao movimento aparente do Sol, quando os mesmos são instalados fixos.

Para uma maior conversão de energia solar em energia elétrica é importante que o painel solar fotovoltaico tenha sua correta orientação geográfica em relação à posição do Sol, garantindo dessa forma uma grande variação de incidência luminosa na sua superfície.

Observações realizadas em campo com o sistema de painel móvel desenvolvido comprovou-se que os motores de corrente contínua funcionaram como esperado, ou seja, o painel se movimenta, corrigindo sua posição, nos dois eixos de liberdade. Entretanto alguns problemas mecânicos foram encontrados principalmente em relação ao acoplamento das engrenagens nos eixos e elevado “ruído” na medição indireta de velocidade. O movimento da estrutura mecânica nos dois eixos foi realizado com precisão aceitável comprovando dessa forma, a utilidade do método indireto de posicionamento solar que utiliza de equações previamente estabelecidas dadas pela geometria Terra-Sol.

Para a avaliação da eficiência dos sistemas de painel fixo e móvel utilizou-se uma metodologia que consistiu em registrar a potência fornecida de cada sistema e desta forma calcular a energia gerada. Os resultados obtidos permitem concluir que houve um significativo acréscimo na produção de eletricidade com o sistema de painéis móveis, entretanto são necessários ajustes em diversos elementos do sistema para assegurar o correto rastreamento MPPT e validação do sistema simulado. A eficiência do sistema como um todo foi avaliada considerando o consumo de energia necessário para tal posicionamento.

O custo total desse sistema é de aproximadamente 60% do valor de um painel moderno de 250W, conforme pode ser constatado no anexo A.3. No entanto, é necessário considerar uma estrutura composta por diversos painéis solares fotovoltaicos para tornar esse tipo de sistema mais economicamente atrativo em face do significativo aumento na produção de eletricidade.

4.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros são sugeridos os seguintes temas para investigação:

- Projeto de uma nova estrutura mecânica de posicionamento automático, para reduzir o esforço mecânico dos motores e o consumo dos mesmos. A título de sugestão sugiro uma estrutura baseada no movimento equatorial, que semelhante ao tipo de montagem utilizada nesse trabalho, movimento azimutal (altitude-azimute) é um tipo de montagem que utiliza dois eixos (ascensão reta e declinação) alinhados com os dois pólos para rastrear o movimento de um objeto pelo espaço. Neste caso ao longo de um dia, o posicionamento é feito apenas com um dos eixos, uma vez que o outro eixo é atualizado de acordo com a declinação solar;
- Projeto de um sistema de controle em malha fechada para a estrutura azimutal;
- Melhorar o algoritmo de busca do ponto de máxima potência. O algoritmo de Perturba e Observa (P&O) é uma técnica que é muito susceptível as variações bruscas de radiação solar incidente;
- Estudar a viabilidade técnica e econômica de uma estrutura de maior porte.
- Proponho também um estudo aprofundado das influências da radiação incidente bem como a temperatura na superfície do painel móvel

REFERÊNCIAS

- ALBRIGTSEN, E. **Global, Diffuse and direct Pyranometer**. Agder University College. Grimstad, p. 32. 2006.
- ALMEIDA, P. M. D. **Modelagem e controle de conversores fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição**. UFJF. Juiz de Fora, p. 189. 2011.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. ANEEL. Brasília, p. 236. 2008.
- CRUZ, A. A. P. **Usina Solar Fotovoltaica de Juiz de Fora**. UFJF. Juiz de Fora, p. 58. 2012.
- DATASHEET - BPSX120, 2016. Disponível em: <<http://www.comel.gr/pdf/bpsolar/BPSX120.pdf>>. Acesso em: março 2016.
- DATASHEET - L298N, 2016. Disponível em: <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/1773.pdf>>. Acesso em: março 2016.
- FILIFELOP, 2016. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-6b5b3-placa-mega-2560-r3-cabo-usb-para-arduino.html>>. Acesso em: junho 2016.
- LABORATÓRIO Solar da UFJF. **Laboratório Solar da UFJF**, 2015. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/LABSOLAR/>>. Acesso em: junho 2015.
- LABSOL - UFRGS. **LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - LABSOL**, 2016. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>>. Acesso em: março 2016.
- LIRA, J. R. V. **Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do ângulo de Inclinação**. UFRN. Natal, p. 65. 2014.
- LOBATO, S. D. C. **Análise Comparativa entre as Principais Técnicas de MPPT com Foco Experimental**. UFJF. Juiz de Fora, p. 51. 2015.
- MAGNOLI, D.; ARAÚJO, R. **Geografia: a construção do mundo: geografia geral e do Brasil**. 1 Ed. ed. São Paulo: Moderna, 2005.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1983.
- NEOYAMA. **Neoyama**, 2016. Disponível em: <<http://www.neoyama.com.br/produtos/micromotores/micro-motor-dc-com-caixa-de-reducao/micro-motor-dc-c-cx-red-tensao-1200-vdc-rpm-3-rpm/>>. Acesso em: março 2016.
- OLIVEIRA, L. L. R. D. **Disseminação e aplicação da energia solar através de protótipos microcontrolados**. UFJF. Juiz de Fora, p. 84. 2008.
- PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. [S.l.]: Hemus, 1981.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro, p. 530. 2014.
- PINTO, A. R. et al. **Manual de normalização de trabalhos**. 2011. 88f. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2011.
- TRABALHO de conclusão de curso. **Wikipédia A Enciclopédia Livre**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Trabalho_de_conclus%C3%A3o_de_curso>. Acesso em: 15 Agosto 2014.
- UNIVERSITY of Oregon. **Solar Radiation Monitoring Laboratory**, 2016. Disponível em: <<http://solardata.uoregon.edu/SunChartProgram.html>>. Acesso em: março 2016.
- VALENTIM, J. A. **Energia Solar Fotovoltaica; recursos disponíveis e limitações a sua propagação no Brasil**. Universidade Católica de Petrópolis. Petrópolis, p. 116. 2015.

Apêndice A

A.1 Código do modelo do painel BPSX120U

```

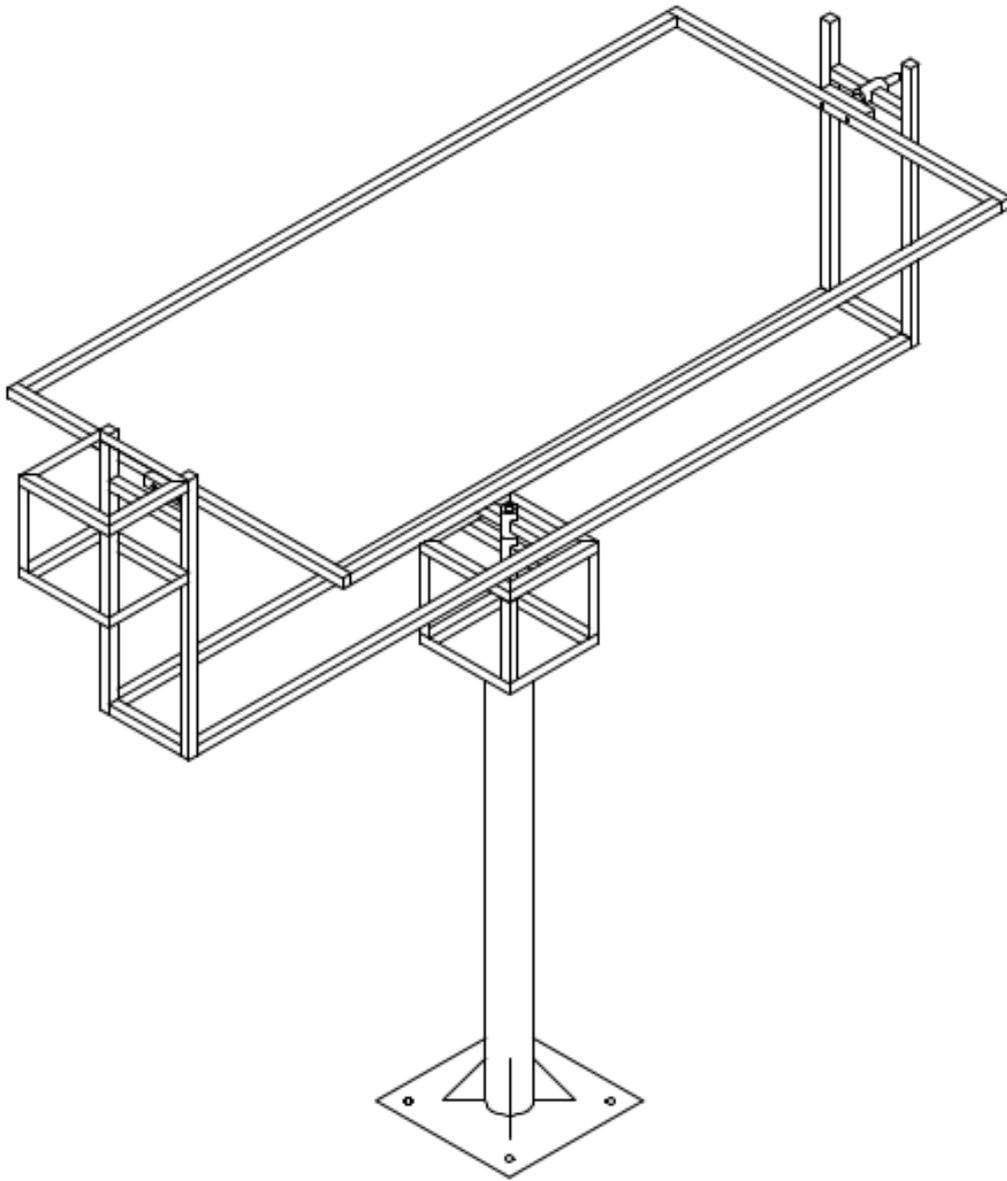
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CÓDIGO PARA O MÓDELO DO PAINEL BPSX120U
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
close all

%% Leitura dos dados
Ta =textread('temp.txt', '', 'delimiter', ',');% Vetor com as temperaturas
H = textread('radia.txt', '', 'delimiter', ',');% Vetor com as radiações
%% Dados da célula fotovoltaica
Irr = 1.1e-10;           % Corrente máxima de saturação
Iccr = 3.87;           % Corrente de curto circuito nas condições STC
a = 0.065/100;        % Coeficiente de temperatura da corrente de curto
Hr = 1000;           % Radiação incidente nas condições STC
Tnoc = 47;           % Temperatura de operação da célula
Tr = 25 + 273.15;    % Temperatura de referência
q = 1.602e-19;       % carga do elétron
n = 1;               % fator de idealidade
k = 1.38e-23;        % constante de boltzman
Eg = 1.12 ;          % Energia do gap do silício
cel = 72;           % número de células

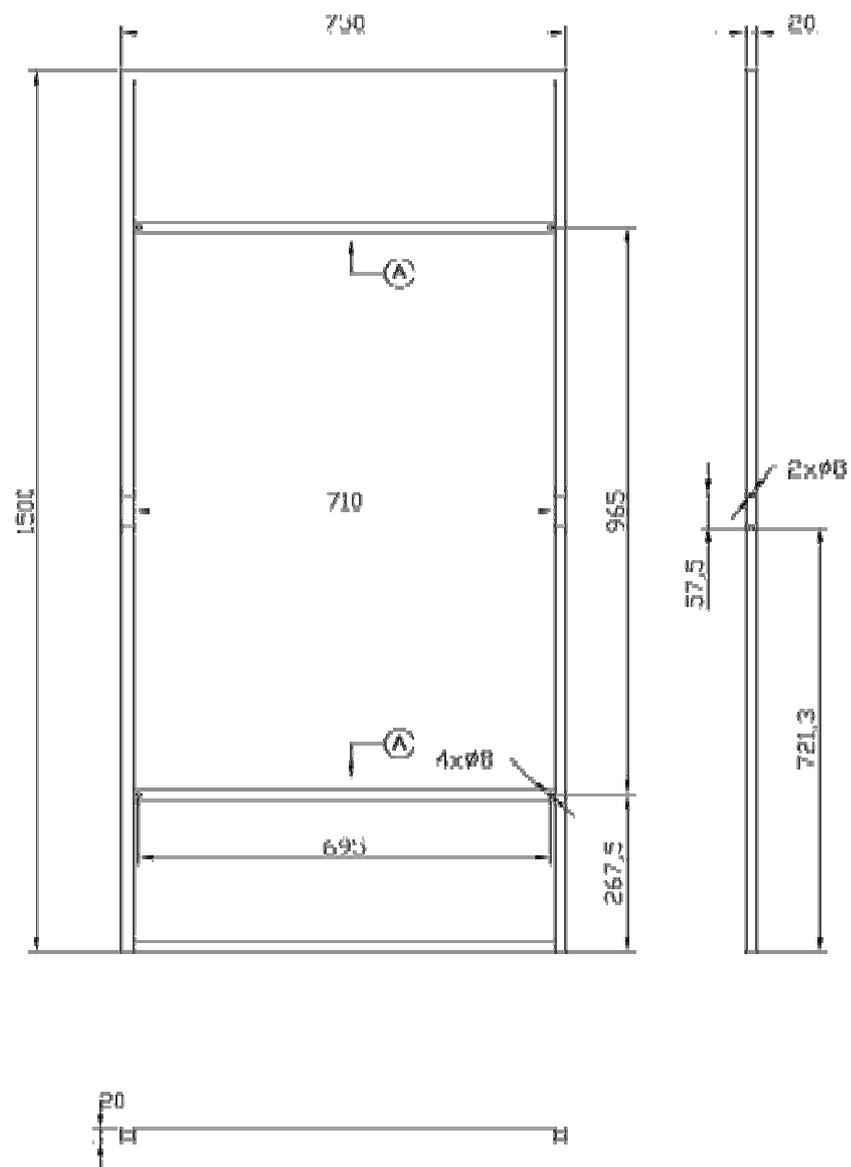
for i=1:length(H)
    if H(i)>0
        H1=H(i);
        Ta1=Ta(i);
        Tc = (Ta1 + (H1/800)*(Tnoc - 20))+273.15;    % Temperatura da célula
        I0 = Irr*((Tc/Tr)^3)*exp((q*Eg/(n*k))*(1/Tr - 1/Tc)); % Corrente máxima de
        saturação reversa
        I1 = (Iccr + a*(Tc-Tr))*(H1/Hr);           % Corrente fotogerada
        Vt = k*Tc/q;                               % Potencial térmico
        Vca = n*Vt*log(1+I1/I0);                   % Tensão de circuito aberto
        Icc = Iccr*(H1/Hr);                         % Corrente de curto circuito
        D = 0:0.001:Vca;
        Vd = 0;
        for j=1:length(D)
            VD(j)=Vd;
            Id = I0*(exp(Vd/(n*Vt))-1);
            I(j) = I1-Id;
            P(j)=VD(j)*I(j);
            Vd = Vd + 0.001;
        end
        Pot(i)=max(P);
    else
        Pot(i)=0;
    end
end
%Energia gerada em Wh
E=sum(Pot)*0.1;
fprintf('Energia gerada no dia é:%f Wh \n',E);

```

A.2 Projeto da estrutura mecânica

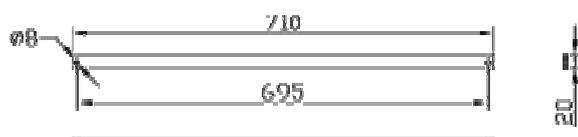


Estrutura para movimento horizontal do painel



Cota em mm

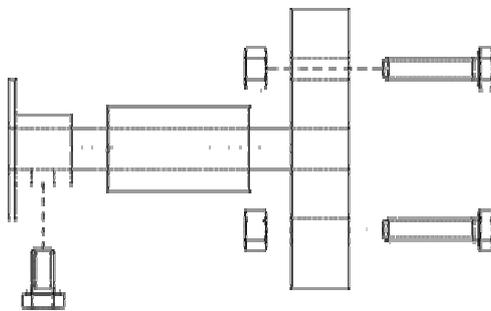
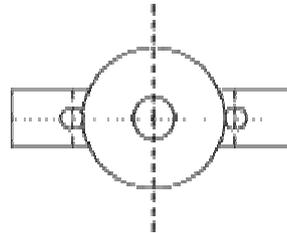
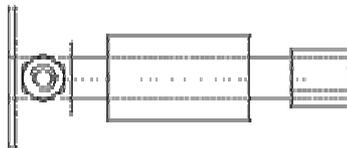
Detalhe A - Detalhe do flange do painel



Cota em mm

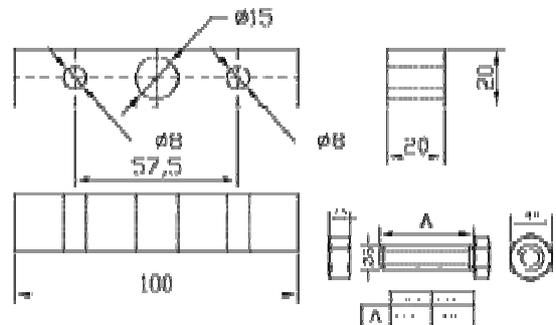
Detalhe C - Acoplamento Motor - Painel

Vista isométrica



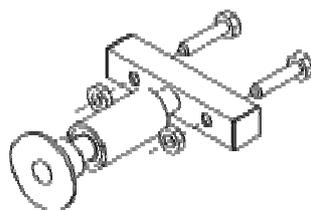
Detalhe com eixo

Detalhe C1 - peça de fixação do eixo no suporte do painel



Nota: 1) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas. 2) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas.

Vista 3D

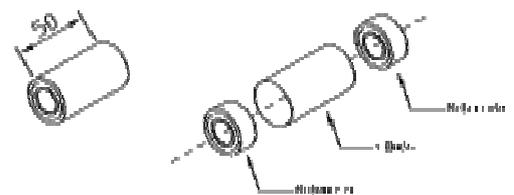


Detalhe C2 - eixo



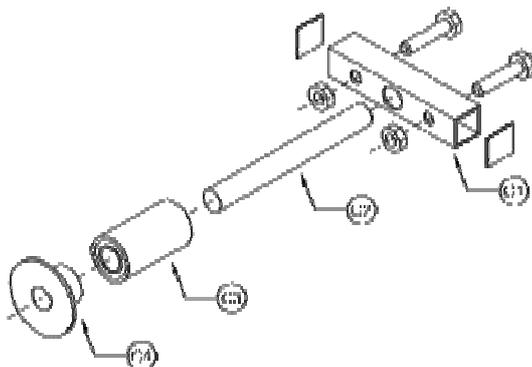
Nota: 1) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas. 2) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas.

Detalhe C3 - peça de fixação do eixo à estrutura

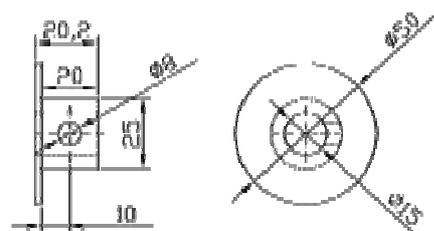


Nota: 1) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas. 2) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas.

Vista 3D explodida

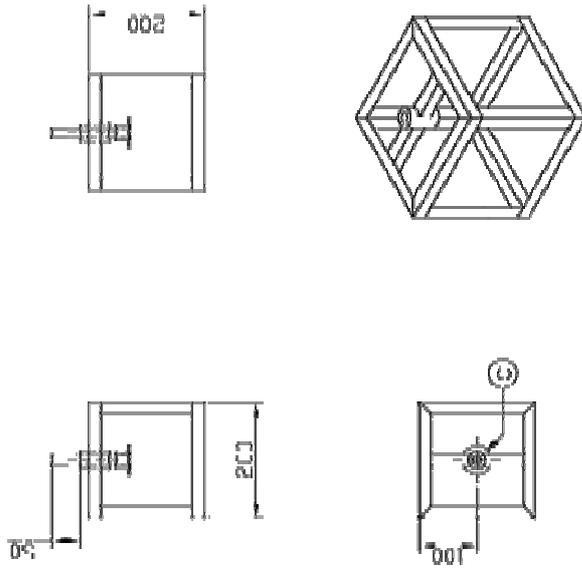


Detalhe C4 - peça de fixação do motor ao eixo



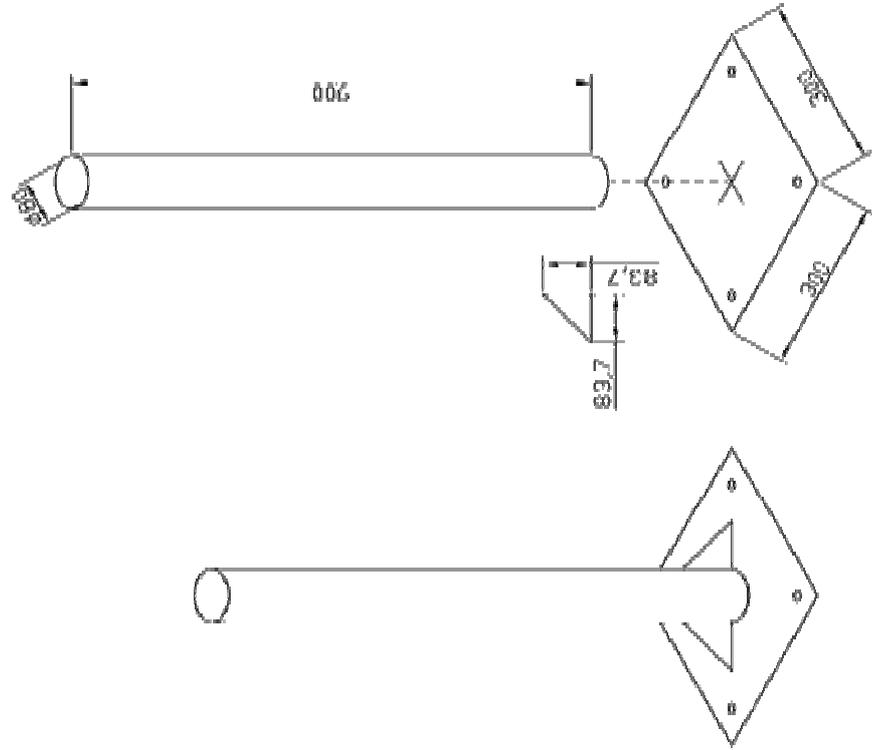
Nota: 1) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas. 2) O eixo deve ser fixado no suporte do painel por meio de parafusos e porcas.

Estrutura para abrigo do motor da vertical



Colado em PVC

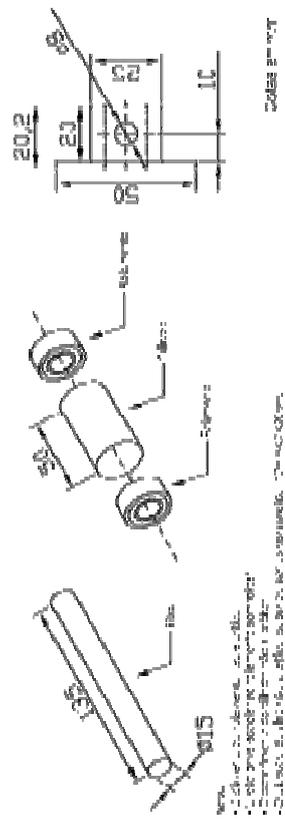
Suporte de fixação do conjunto



Nota:
- 1. Baseado em projeto de fixação de placa solar.

Colado em PVC

Detalhe C - eixo de fixação de eixo à estrutura e ao motor



Nota:
- 1. Eixo de fixação de eixo à estrutura e ao motor.
- 2. Baseado em projeto de fixação de placa solar.
- 3. O eixo é fixado na estrutura do motor.
- 4. O eixo é fixado na estrutura do motor.
- 5. O eixo é fixado na estrutura do motor.

Colado em PVC

A.3 Orçamentos

Orçamento 1: RAFTER IND. E COM. DE FERRO E AÇO LTDA

Data do orçamento: 10/06/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	TB METALON 20X20 CH 1.2	2	19,4	38,8
2	CANTONEIRA 3/4X1/8	1	18,7	18,7
3	BR CHATA 3/4X1/8	1	6,4	6,4
4	CH GALV. SLIT. 20 CM	1,92	4,69	9
				75,12

Orçamento 2: NAPOLI PEÇAS EIRELI

Data do orçamento: 26/10/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	Engrenagem metalbel Alum. 76 D. MOD 2	2	12	24
2	Sem Fim Alum. Inj. 1,3/8 x 26mm Varão FU	2	10	20
				44

Orçamento 3: CASA UNIVERSAL LTDA

Data do orçamento: 29/10/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	Rolamento 629-HCH	2	9	18
				18

Orçamento 4: Loja FILIPEFLOP (<http://www.filipeflop.com>)

Data do orçamento: 19/11/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	DHT22	1	36,9	36,9
2	LM35	4	5,9	23,6
3	TSL2561	2	49,9	99,8
4	Barra de pinos	4	1,9	7,6
				167,9

Orçamento 5: Loja EletrónBR (Mercado Livre)

Data do orçamento: 19/11/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	SD shield	1	8,99	8,99
2	DS1302	1	13	13
3	ACS712	3	18,5	55,5
4	Arduino Mega	1	73,9	73,9
				151,39

Orçamento 6: Loja Nadiel (Mercado Livre)

Data do orçamento: 29/10/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	jumpers	1	13,99	13,99
				13,99

Orçamento 7: Loja Robocore (<https://www.robocore.net>)

Data do orçamento: 19/11/2015				
Item	Produto	Quant.	Preço unit. (R\$)	Preço total (R\$)
1	Motoredutor AK510	2	59	118
				118

Orçamento 8: Mão de obra

Nota: Ficou acertado a quantia de R\$ 50,00 (cinquenta reais) pelo serviço contratado

Orçamento final

Orç.	Fornecedor	Preço Total (R\$)
1	RAFER IND. E COM. DE FERRO E AÇO LTDA	75,12
2	NAPOLI PEÇAS EIRELI	44
3	CASA UNIVERSAL LTDA	18
4	LOJA FILIPEFLOP	167,69
5	LOJA ELÉTRONBR	151,39
6	LOJA NADIEL	13,99
7	LOJA ROBOCORE	118
8	MÃO DE OBRA	50
		638,19