

DANIEL RIZZO CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR BIAxIAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C331d
2011
Carvalho, Daniel Rizzo, 1984-
Desenvolvimento de um rastreador solar biaxial / Daniel
Rizzo Carvalho. – Viçosa, MG, 2011.
xii, 42f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 39-40

1. Energia solar. 2. Sistemas de energia fotovoltaica.
3. Geração de energia fotovoltaica. 4. Radiação solar.
5. Microcontroladores. 6. Células solares. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 621.47

DANIEL RIZZO CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR BIAXIAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de julho de 2011

Prof. Roberto Precci Lopes
(Co-orientador)

Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho
(Orientador)

“A experiência vem com a vivência. Quando os trabalhos dão errado, os projetos falham, as construções não funcionam e tudo parece perdido, surge um fato novo para o qual ainda não tínhamos atentado. No final, aprendemos muito, e a sensação de dever cumprido é gratificante!”

Daniel Rizzo Carvalho

À minha querida esposa Aninha, amado filho Giovanni, papai, mamãe, irmãos e todos os amigos, luz nos momentos obscuros e alicerce nos momentos conturbados.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais João Daniel B. Carvalho e Angela Maria Rizzo Carvalho, pela educação, exemplo de caráter e honestidade.

À minha esposa Aninha e filho Giovanni, pelo apoio nos momentos mais difíceis, e pela confiança durante essa jornada.

Aos meus irmãos e familiares pela compreensão durante o tempo dos estudos e pelo apoio incondicional nesta caminhada.

Ao meu orientador prof Adílio Flauzino de Lacerda Filho, pela atenção, experiência, paciência, sabedoria, confiança e pelos “váaaarios” conselhos profissionais e pessoais que tive o privilégio de receber.

Aos meus Co-Orientadores: Delly Oliveira Filho e Roberto Precci Lopes pelos ensinamentos, amizade e pelas inúmeras dicas que me foram confiadas durante meus trabalhos.

Aos professores Ricardo Capucio, Jadir, Arêdes, Brian e Zolnier pelas ajudas nos momentos de dificuldade e pelos ensinamentos nos momentos de dúvida.

Aos meus grandes e queridos amigos: Jofranção, Fabão, Ivanzão, Nildão, Guilhermão, Oscarzão, Maurilhão, Jairão, Pedrão, Evan, Conceição e vários outros que me ajudaram e fizeram entender o sentimento real da amizade.

Ao corpo técnico da Universidade, em especial aos servidores da oficina, da serralheria, ao Álvaro do laboratório de eletrônica, ao Hamilton, Catitu, Edson, Zé Eustáquio e todo o pessoal da secretaria, em especial à Graça.

À Universidade Federal de Viçosa pela estrutura disponibilizada.

À Capes pelo auxílio financeiro indispensável à realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Daniel Rizzo Carvalho, filho de João Daniel Brandão Carvalho e Angela Maria Rizzo Carvalho, nasceu em 27 de março de 1984, na cidade de Cachoeiro de Itapemirim, no Estado do Espírito Santo.

Graduou-se em Física pela Universidade Federal de Viçosa em dezembro de 2008. Em julho de 2009 iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração em Energia na Agricultura, com experimentos na área de Energia Solar, concluindo o curso em julho de 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	vii
LISTA DE FIGURAS E ANEXOS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	7
2.2 FENÔMENO FOTOVOLTAICO	9
2.3 TEORIA DE RASTREAMENTO SOLAR	11
2.4 MÉTODOS DE RASTREAMENTO SOLAR	13
2.4.1 RASTREADORES PASSIVOS	14
2.4.2 RASTREADORES ATIVOS	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 UNIDADE DE SENSORIAMENTO	20
3.2 UNIDADE DE MOVIMENTAÇÃO	23
3.3 UNIDADE DE PROCESSAMENTO	24
3.4 UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO	25
3.5 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 DESEMPENHO SOB CONDIÇÕES PERTURBADAS DE INSOLAÇÃO	43
4.2 DESEMPENHO SOB BOAS CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO	35
5. CONCLUSÕES	39
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS	44

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

MBD	Milhões de barris por dia.
LDR	Light Dependent Resistor
kg	kilograma ($g \cdot 10^3$)
W	watt
KW	kilowatt ($W \cdot 10^3$)
Wh	watthora
AM	massa de ar
γ_s	altitude solar
α_s	azimute solar
β	posicionamento do absorvedor solar
θ	ângulo de incidência da radiação solar
S_o	área de absorção solar
S_{ap}	área de absorção solar aparente
I	radiação solar
W_{abs}	energia absorvida
P	potência
R	resistência
I_r	corrente através de um resistor

LISTA DE FIGURAS E ANEXOS

Figura 1 -	Emissões de Dióxido de Carbono nos Estados Unidos no ano de 2008. - -----	05
Figura 2 -	Média diária de radiação solar global incidente entre países com subsídios para geração solar e o Brasil. -----	06
Figura 3 -	Descrição dos ângulos de posicionamento solar.-----	08
Figura 4 -	Espectro solar. -----	09
Figura 5 -	Curva característica de uma célula fotovoltaica. -----	11
Figura 6 -	Área aparente de absorção solar em função do ângulo de incidência. -----	12
Figura 7 -	Modelo de rastreador solar passivo. -----	14
Figura 8 -	Detector por placa opaca. -----	29
Figura 9 -	Detector por montagem inclinada de sensores.-----	16
Figura 10 -	Detector por colimação com lente amplificadora. -----	17
Figura 11 -	Processo de seleção dos componentes utilizados na prototipagem.----	21
Figura 12 -	Geometrias testadas para a unidade de sensoriamento.-----	21
Figura 13 -	Projeto e construção da unidade de sensoriamento.-----	22
Figura 14 -	Unidade de sensoriamento acoplada à placa solar.-----	23
Figura 15 -	Unidade de motorização. -----	24
Figura 16 -	Microcontrolador ARDUINO/ATMEGA328P. -----	25
Figura 17 -	Fonte de alimentação.-----	26
Figura 18 -	Esquema de funcionamento harmonizado do rastreador. -----	26
Figura 19 -	Desempenho de um sistema rastreador. -----	27/28
Figura 20 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 18/11/2010.-----	31
Figura 21 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 19/11/2010.-----	31
Figura 22 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 20/11/2010.-----	32
Figura 23 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 10/12/2010.-----	32
Figura 24 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 11/12/2010.-----	33

Figura 25 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 13/12/2010.-----	33
Figura 26 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 12/12/2010.-----	35
Figura 27 -	Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 21/12/2010.-----	35
A1 -	Sistema de rastreamento. -----	42
A2 -	Cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola com detalhes do sistema rastreador e placa fixa. -----	42
A3 -	Pôr do sol e instrumentação para coleta dos dados.-----	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Balanço da oferta e demanda de derivados do petróleo no período 2006/2008.....	04
Tabela 2 - Resultados da análise para os diferentes tamanhos de sensores de acordo com os parâmetros propostos.....	29
Tabela 3 - Valores quantitativos para o período de insolação perturbada.....	34
Tabela 4 - Valores quantitativos para o período de boa insolação	36

RESUMO

CARVALHO, Daniel Rizzo, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Desenvolvimento de um rastreador solar biaxial.** Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Co-orientadores: Delly Oliveira Filho e Roberto Precci Lopes.

Neste trabalho estão apresentados os resultados do estudo relacionado à produção de eletricidade utilizando um painel fotovoltaico acoplado ao mecanismo de rastreamento solar. Objetivou-se desenvolver um equipamento eficaz no rastreamento, de baixo custo e consumo de energia, visando à possibilidade de uso residencial, industrial e a geração distribuída de energia. Avaliou-se o desempenho do rastreador, comparando-o com um sistema fixo. Com base nos resultados analisados, observou-se aumento significativo na produção de energia do painel fotovoltaico acoplado ao sistema de rastreamento em relação ao sistema fixo à inclinação da latitude local. Seu desempenho eletromecânico foi satisfatório, não necessitando de manutenção durante a fase experimental mesmo quando exposto às mais variadas condições de tempo. O sistema demonstrou grande potencial de aplicação, usabilidade e robustez.

ABSTRACT

CARVALHO, Daniel Rizzo, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Development of a two-axis solar tracker.** Advisor: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Co-advisors: Delly Oliveira Filho and Roberto Precci Lopes.

This work presents the results of the study related to the production of electricity using a photovoltaic panel attached to the solar tracking mechanism. The objective was to develop a tracker equipment effective, with low cost and energy consumption, targeting the residential use, industrial and distributed generation of energy. Was evaluated the performance of the tracker, comparing it to a fixed system, showing its greatest potential for conversion. Based on the results analyzed, was observed a significant increase in energy conversion panel coupled to the tracking system in relation to fixed panel in a tilt angle accordingly local latitude. Its electromechanical performance was satisfactory, with no need for maintenance during the trial period and exposed to various weather conditions. The system has shown great potential for application usability and robustness.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade sempre esteve associado à capacidade do homem de extrair, transformar, transportar e utilizar a energia. Cerca de dois séculos atrás, a tração animal era a fonte de potência mais utilizada no transporte e para o trabalho mecânico. Naquela época, nos Estados Unidos da América, vinte por cento das terras agrícolas eram utilizadas para alimentação de animais para tração, mesmo cenário da maioria dos países que, hoje, são considerados desenvolvidos ou em desenvolvimento (SEXTON et al., 2007).

Atualmente, a busca por fontes de energia ambientalmente corretas para atender a crescente demanda não se restringe apenas ao desenvolvimento e implementação de matrizes geradoras. As técnicas de racionalização e otimização das potencialidades dos instrumentos de geração energética, são importantes e tem merecido estudos à parte. Depreende-se que para a geração solar fotovoltaica, por exemplo, a melhor maneira de otimizar a potência energética produzida, é acoplar nestes sistemas os mecanismos de rastreamento solar que assegurem a perpendicularidade entre a superfície receptora e a radiação incidente, possibilitando ganhos superiores a 40% (DORADO et al., 2011).

A energia solar fotovoltaica, juntamente com a eólica, são as que mais crescem em utilização no mundo. No início da década de 1970, com a crise do petróleo, a indústria de células solares se esforçou para desenvolver tecnologias inovadoras que permitissem reduzir o custo de produção dos painéis fotovoltaicos. As pesquisas indicavam, sistematicamente, a viabilidade do uso de materiais abundantes na superfície terrestre, isso possibilitou a utilização do silício como o principal componente para a fabricação dos módulos, o que tornaria a energia solar uma alternativa atraente do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Porém, existem alguns fatores limitantes no processo de geração fotoenergética, um deles diz respeito ao espectro de radiação aproveitada no processo, que é muito pequeno, da ordem de 1 μm . Estudos envolvendo materiais com maior faixa de aproveitamento estão sendo desenvolvidos, ainda sem resultados satisfatórios. Outro problema deste processo pode ser explicado pela quantização da energia e trata da impossibilidade de excitação de um elétron por mais de um pacote de energia, isso implica no desperdício de fótons, intrínseco ao processo, o que tende a transformar este excesso em calor e conseqüentemente diminuir o rendimento dos painéis fotovoltaicos

que, de acordo com Acevedo (2006), o limite máximo para a eficiência das células solares de CdS/CdTe é de 17,6%.

Estando as tecnologias atuais tão próximas do limite teórico para a transformação fotovoltaica, as pesquisas visando a redução de custo e a popularização de sistemas solares, apontam, sistematicamente, em duas direções: a) o desenvolvimento de novas "dopagens" e estruturas cristalinas para fabricação de painéis fotovoltaicos capazes de atuar num espectro mais amplo de radiação e, b) o desenvolvimento de mecanismos de adequação para otimização da posição dos sistemas solares em relação à radiação incidente.

Um dos principais problemas observados nas pesquisas envolvendo o desenvolvimento de novos materiais está no fato de que o silício atualmente utilizado, é um dos materiais, dentre os possíveis para as atuais tecnologias, mais baratos por ser abundante na crosta terrestre. Estruturas mais eficientes, com multicamadas de diferentes materiais, poderiam substituir o silício, porém se tornariam demasiadamente complexas, com conseqüente aumento de preços.

Por outro lado, as variações na intensidade da insolação durante o dia e noite, o ângulo de inclinação do eixo da terra, em relação ao sol, durante as diferentes estações do ano e a distância entre a Terra e o Sol, fazem com que a energia elétrica média produzida por uma célula solar estática, durante o ano, seja de aproximadamente, 20% da capacidade instalada (CALTECH, 2005). Isto evidencia a necessidade do aperfeiçoamento de sistemas de rastreamento solar, visando seu desempenho, confiabilidade, interface e popularização.

Neste contexto, as pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias de rastreamento solar têm sido amplamente incentivadas, com o propósito de potencializar a capacidade de geração dos coletores térmicos e dos sistemas fotovoltaicos.

Uma das dificuldades na aceitação de sistemas rastreadores diz respeito aos custos com projeto, planejamento e construção dos dispositivos. Isto se deve à falta de projetos que visem a produção em larga escala, com a utilização de componentes de baixo custo e alta robustez que não exijam manutenção periódica e que sejam de fácil instalação e manutenção.

A viabilidade da utilização dos mecanismos de rastreo é fortemente respaldada na possibilidade de otimizar, ao máximo, a área de captação. Em locais nobres, como por exemplo, na cobertura de edifícios, onde não há sombreamento e a área é reduzida, seria possível concentrar, no mesmo local, as eventuais necessidades de manutenção e

aumentar em até 60% a captação energética. A utilização de mecanismos de rastreamento em usinas solares, complexos hospitalares, aeroportuários e campos de futebol, reduziria a demanda energética complementar durante o período de insolação, e contribuiria para a viabilidade da geração distribuída de energia elétrica.

Em locais de difícil acesso ou remotos como ilhas, fazendas, aldeias indígenas, embarcações e veículos de logística desértica, os mecanismos de rastreamento solar ganham especial importância, pois podem viabilizar a auto-suficiência destas unidades. Com base no exposto, objetivou-se com este trabalho projetar, construir e analisar um rastreador solar compacto de fácil operacionalização, instalação e baixa manutenção, visando aplicações residenciais e industriais.

Como objetivos específicos, enumeram-se:

1. Divulgar as tecnologias e potencialidade do rastreamento solar;
2. Projetar um rastreador solar biaxial do tipo “plug & play”, utilizando apenas três fotossensores na construção da unidade eletro-óptica, lógica pré-programada e baixo custo de produção/manutenção;
3. Incorporar rotinas de otimização energética no gerenciamento das unidades motoras e de processamento;
4. Analisar o ganho de energia do sistema com rastreamento em relação ao sistema fixo, usualmente utilizado, para as condições locais de Viçosa – MG.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A demanda mundial por petróleo tem crescido desde o século XIX em consequência do desenvolvimento tecnológico experimentado pela humanidade, especialmente a popularização do uso dos motores de combustão interna. A exploração, do petróleo, em larga escala, iniciada pelos russos em 1848, supre aproximadamente 39% da demanda energética mundial e desde 1984 se consome mais petróleo do que se extrai (FISCHER e BUCHANAN, 2010).

O petróleo, além de ser combustível não-renovável, causa impactos ambientais na extração, refino, transporte e no consumo, e está susceptível à variação de preços, decorrente de inúmeros fatores. Isso provoca, em nível global, instabilidades econômicas e políticas que podem ser observadas, inclusive, nas relações multilaterais de comércio e em alguns conflitos internacionais.

Na Tabela 1, dados apontam déficit mundial no balanço do petróleo e seus derivados, com aumento consecutivo da demanda e oferta irregular no período de 2006 a 2008 sugerindo, assim, urgente intervenção governamental na reformulação da matriz energética mundial (USDOE, 2009).

Tabela 1 - Balanço da oferta e demanda de petróleo e derivados no período 2006 a 2008

BLOCOS /PAÍSES	Oferta (MBD)	Demanda (MBD)			1º sem	
			Oferta (MBD)	Demanda (MBD)	Oferta (MBD)	Demanda (MBD)
	2006	2006	2007	2007	2008	2008
OECD*						
EUA	8,33	20,69	8,46	20,68	8,64	19,88
Outros OECD	13,26	28,87	13,01	28,45	12,67	28,80
Total OECD	21,59	49,56	21,46	49,13	21,30	48,68
Não-OECD						
OPEC**	35,84	7,24	35,43	7,57	36,70	7,74
Rússia - U.S.S.R.	12,15	4,20	12,60	4,20	12,59	4,34
Outros Não-OECD	14,96	23,98	14,93	25,01	14,76	25,63
Total Não-OECD	62,95	35,42	62,97	36,77	64,05	37,72
Total Mundial	84,54	84,98	84,43	85,90	85,35	86,39

*OECD: Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

**OPEC: Organização dos Países Exportadores de Petróleo.

Fonte: USDOE, 2009.

Como o petróleo, o carvão também é uma fonte fóssil que, só nos Estados Unidos, responde por 37% das emissões de dióxido de carbono (Figura 1). Estima-se que as reservas mundiais de carvão, se continuarem a ser exploradas como nos últimos anos, durarão no máximo mais 132 anos (FISCHER e BUCHANAN, 2010).

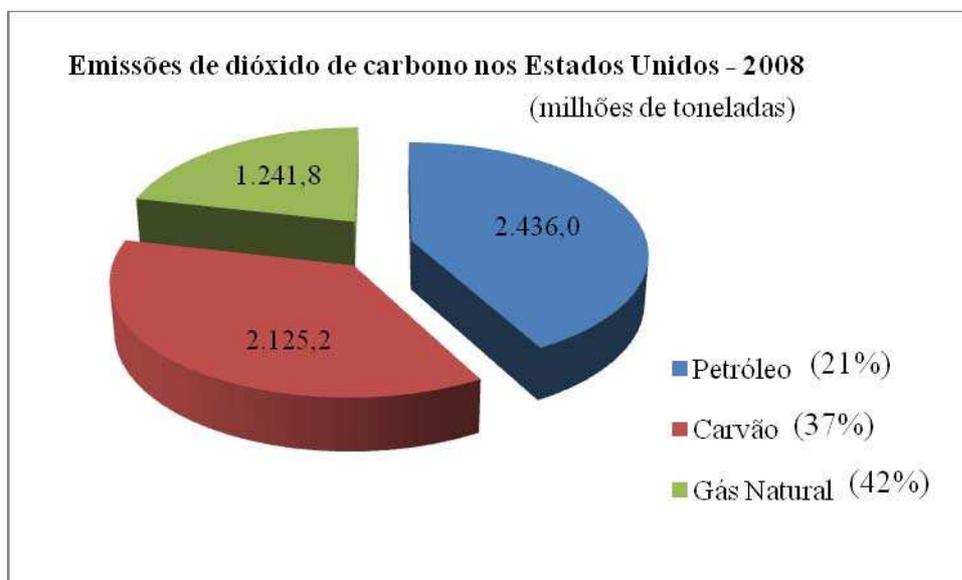


Figura 1 - Emissões de Dióxido de Carbono nos Estados Unidos, no ano de 2008.

Fonte: USEIA, 2009.

Aproximadamente 77% da energia elétrica produzida no Brasil é oriunda de hidrelétricas (BEN, 2010). A hidroeletricidade é fortemente dependente do equilíbrio de fatores climáticos naturais, que estão sendo cada vez mais afetados pelo aquecimento global, além disso, a construção de novas unidades, de médio e grande porte, tem demonstrado inviabilidades ambientais, técnicas e sociais.

Diante dos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis e os últimos acidentes em usinas nucleares, a energia solar vem ganhando destaque como opção para suprimento localizado de energia.

A energia solar pode vir a garantir, dentre outras possibilidades, o suprimento de energia elétrica em situações emergenciais, e já é uma realidade no abastecimento energético de comunidades isoladas, além disso, cada vez mais consumidores das classes A, B e C estão optando pela utilização de sistemas solares integrados a fim de diminuir seu consumo de energia, uma vez que a política de favorecimento para consumidores com baixa demanda elétrica se torna demasiadamente discrepante,

fazendo com que as “tarifas sociais” sejam compensadas pela punição tarifária aos consumidores com demanda energética proporcionalmente alta.

O Brasil, devido sua grande área territorial e posição geográfica, possui grande potencial para o aproveitamento da energia solar. Apesar do potencial, a participação da energia solar na matriz energética ainda é pequena em relação a países cuja disponibilidade e qualidade da radiação são muitas vezes inferiores.

Em se tratando de sistemas solares, o Brasil necessita, ainda, de muitos estudos e desenvolvimento tecnológico, quando se compara o seu potencial ao dos países com subsídios (Figura 2) à utilização desta fonte, observa-se grande discrepância que poderia ser explorada.

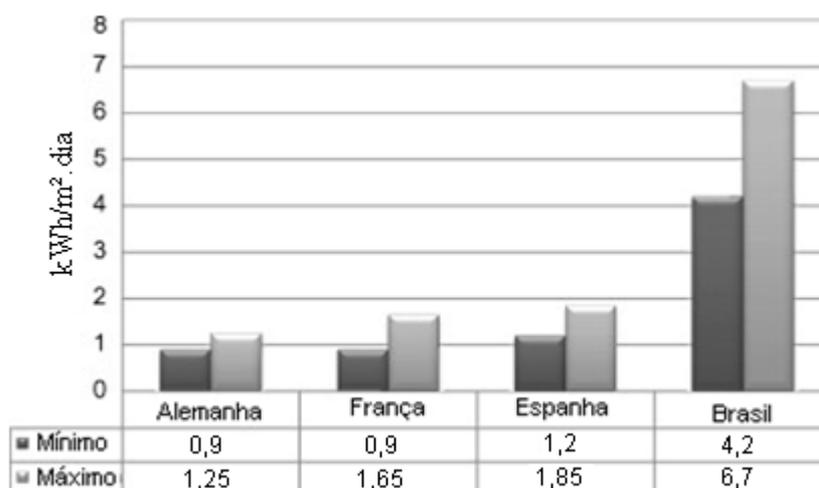


Figura 2 - Média diária de radiação solar global incidente entre países com subsídios para geração solar e o Brasil.

Fonte: TOLEDO et al., 2010.

Apesar dos elevados índices de radiação para aproveitamento direto da energia solar, no Brasil seu uso se restringe, na quase totalidade, à utilização para o aquecimento de água. Em termos globais, a produção de energia baseada em técnicas solares, corresponde a apenas 1,7% do total mundial que é de, aproximadamente, 396.738 GJ (WEISS et al., 2007).

Sendo assim, a energia solar fotovoltaica que já é uma realidade em diversos países, no Brasil é muito promissora e está se popularizando, cada vez mais, devido à redução de custo dos módulos solares, conscientização ambiental, robustez, baixa manutenção e principalmente da elevada vida útil dos mecanismos empregados nestes projetos.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A intensidade da radiação solar, quando não afetada pela condição da atmosfera, depende, preponderantemente, da distância em relação ao sol. Esta distância varia ao longo do ano de $1,47 \times 10^8$ a $1,52 \times 10^8$ km, conseqüentemente, a intensidade da radiação que chega ao topo da atmosfera, varia entre 1.325 e 1.412 W/m².

A radiação ao penetrar à atmosfera sofre ações múltiplas de absorção, dispersão, transmissão e reflexão o que reduz seus níveis principalmente em dias parcialmente nublados em regiões ao nível do mar. Eventualmente, pode-se observar picos de irradiância da ordem de 1.300 W/m², ocorridos por conseqüência de múltiplas reflexões e interferência construtiva das ondas.

Tomando a Terra como referência, o sol percorre uma trajetória que varia ao longo do dia e durante o ano. Conhecer essa trajetória é de fundamental importância para projetar sistemas solares. A posição do sol pode ser determinada, em qualquer local, conhecendo-se a altitude e o azimute solar.

O azimute solar (α_s) é descrito tomando-se o eixo da Terra como referência, e atribuindo-se angulação zero para o sul. Ângulos para leste são atribuídos com sinal negativo e a oeste com sinal positivo.

A altitude solar (β_s) é definida como sendo o ângulo entre a linha que liga a terra ao sol e o plano do horizonte.

Recomenda-se que os painéis fotovoltaicos fixos sejam posicionados à angulação (β), que varia em função da latitude local, e faceados para o norte ou sul dependendo do hemisfério em que a região se localiza (Figura 3).

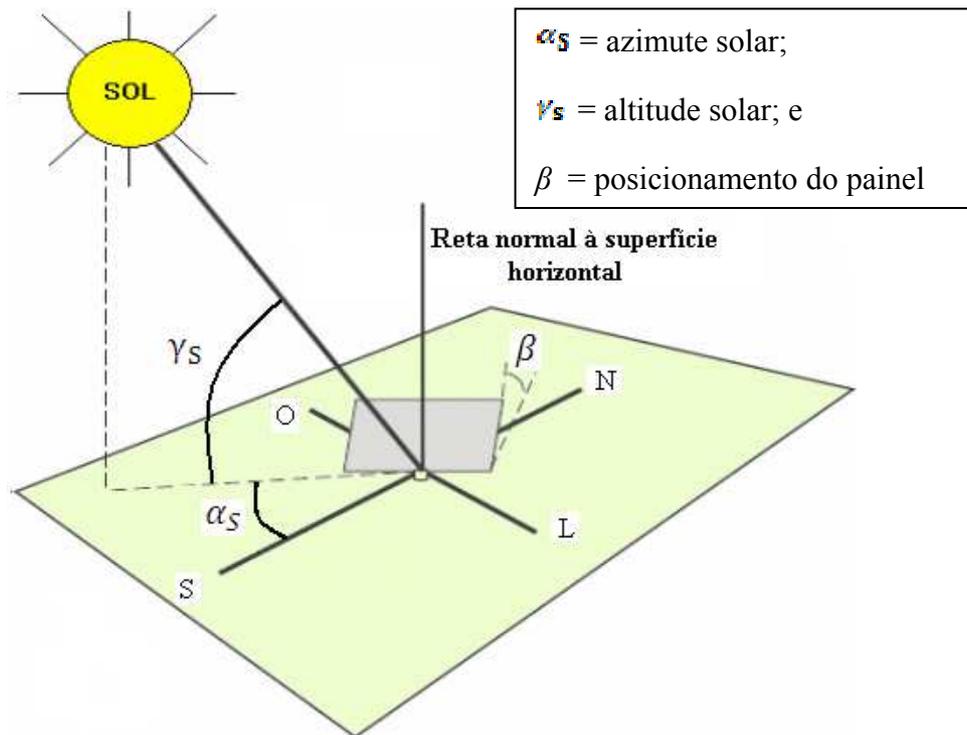


Figura 3 - descrição dos ângulos em relação ao sol.

Na superfície terrestre, a massa de ar (AM) é um dos principais fatores que afetam a intensidade da radiação. A massa de ar é uma grandeza adimensional e fornece a distância percorrida pela radiação solar ao atravessar a atmosfera. Pode ser calculada utilizando-se a equação 1:

$$AM = \frac{1}{\text{sen } \gamma_s} \quad (1)$$

Sendo

- AM = massa de ar, adimensional; e
- γ_s = azimute solar, ângulo em graus.

Quando a altitude solar está perpendicular ao plano da Terra em que se encontra o observador ($\gamma_s = 90^\circ$), o caminho percorrido pela radiação é o mais curto, fazendo com que $AM = 1$.

A massa de ar interfere na irradiância espectral que chega à superfície terrestre por absorver determinados comprimentos de onda do espectro original. Na Figura 4 observa-se o espectro solar no espaço ($AM = 0$) e na superfície terrestre ($AM = 1,5$).

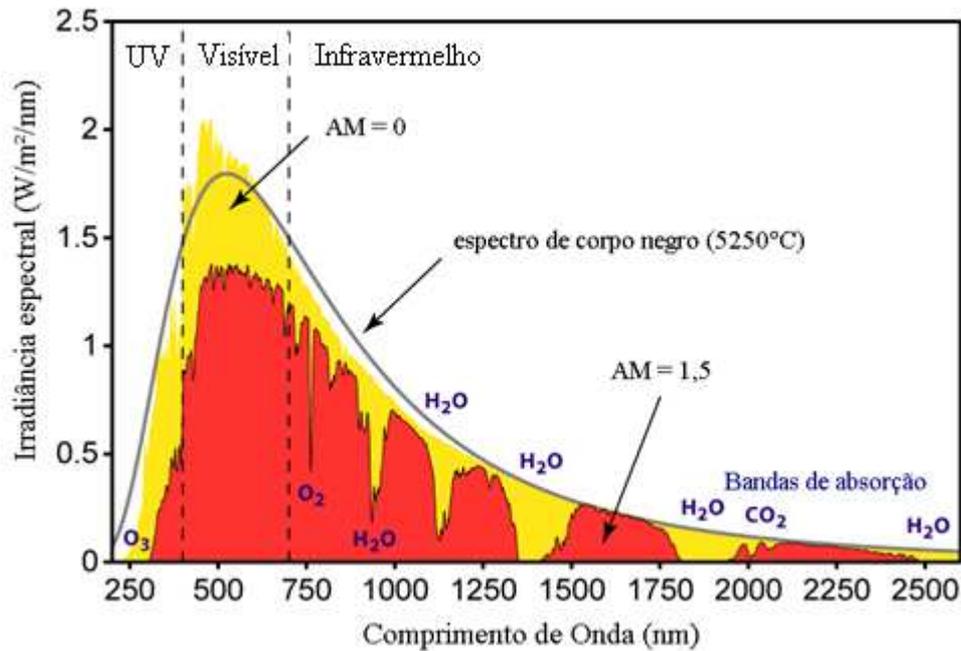


Figura 4 - Espectro solar.

Os painéis fotovoltaicos são fabricados para fornecerem uma determinada potência, usualmente denominada potência de pico (Wp), em condições padrões de funcionamento (STC: Standard Test Conditions): irradiância de $1000 W/m^2$, temperatura de $25^{\circ}C$ e $AM = 1,5$.

2.2 FENÔMENO FOTOVOLTAICO

Os primeiros relatos acerca do efeito fotovoltaico datam de 1839, quando Edmond Becquerel observou o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto à radiação (FLOOD, 1986). Apesar de o primeiro aparato fotovoltaico ter sido construído no ano de 1876, a produção de fato, de sistemas fotovoltaicos iniciou-se após a Segunda Guerra Mundial, quando soviéticos e americanos iniciaram a corrida espacial e perceberam a possibilidade de fornecer energia elétrica para equipamentos em órbita utilizando painéis fotovoltaicos.

Sendo assim, na construção das células solares são empregadas estruturas semicondutoras, estas possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução vazia, no zero absoluto. Fótons, na faixa da luz visível, com energia superior ao "gap" do material, podem excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, isto torna estes materiais fotocondutores,

aumentando a condutividade com o aumento da intensidade luminosa e caindo a zero quando se desliga a fonte luminosa e o equilíbrio se restabelece.

Com o objetivo de amplificar a condutividade dos semicondutores pode-se "dopar" estes materiais com impurezas "tipo n" que possuem elétrons sobrando, e/ou "tipo p" que carecem de elétrons livres (CASTRO, 2002).

A separação entre estas duas bandas de energia, ou "gap" de energia, é da ordem de 1,12 eV, ou $1,8 \times 10^{-19} \text{ J}$. Quando esses portadores de carga são excitados, a única opção é atravessar a região proibida e alcançar a banda de condução.

Pelo fato dos semicondutores possuírem elevado número de estados disponíveis na banda de condução, a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução, ocorrerá, portanto, para um número significativo de elétrons que deixarão lacunas de suas antigas posições na banda de valência. Os elétrons da banda de condução e as lacunas na banda de valência, estas funcionando como portadores positivos de carga, contribuirão para a condutividade.

No entanto, nem todos os fótons possuirão exatamente a energia necessária para realizar o transporte dos elétrons através da região proibida, os que possuírem mais energia terão o excedente convertido em calor, já os que possuírem menos energia, não serão aproveitados, isso diminui, em muito, o potencial máximo de eficiência das células solares.

Observa-se atualmente que as diferentes tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas comerciais, como observado por Acevedo (2006) para as células de CdS/CdTe, estão em condições de estabilização de seus rendimentos. No entanto, destacam-se as células multicamadas e as orgânicas com rendimento máximo ainda não estabilizado.

Cada painel solar é constituído por diversas células solares, cada uma produzindo relativamente pouca energia, variando de acordo com o fabricante. Usualmente cada célula produz tensão em torno de 0,4 V e densidade de corrente da ordem de 30 mA.cm^{-2} , estas células ficam dispostas em arranjos que maximizem e potencializem sua utilização. A curva de potência para cada célula específica pode ser observada na figura 5.

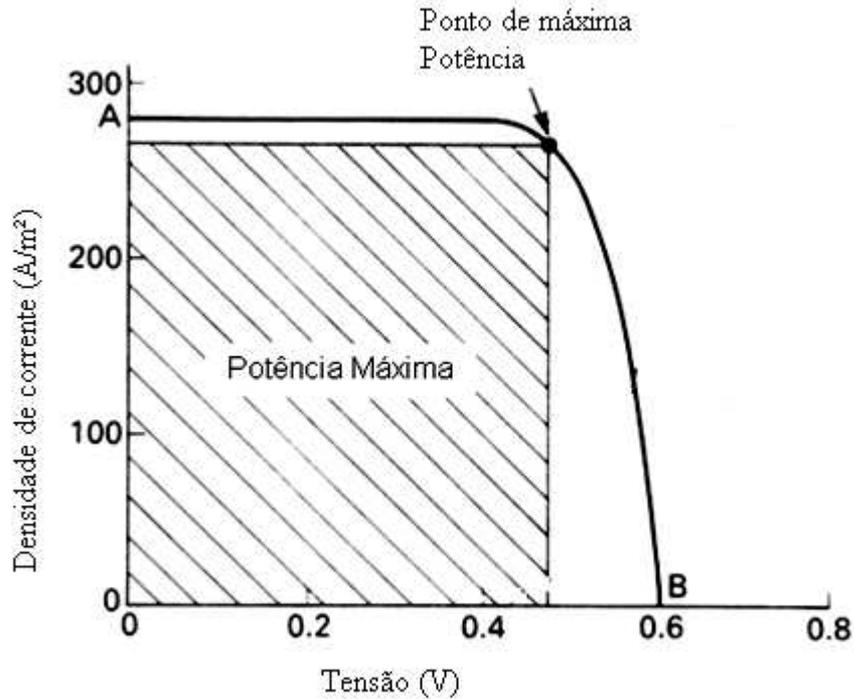


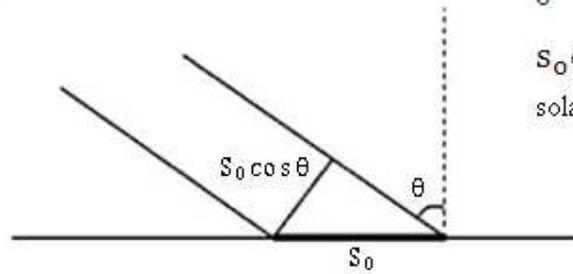
Figura 5 – Curva característica de uma célula fotovoltaica

Os cinco parâmetros (V_{oc} , I_{cc} , P_{max} , V_{mp} e I_{mp}) que são, normalmente, especificados pelo fabricante podem ser explicados da seguinte forma:

- Tensão a vazio (V_{oc}): tensão nos terminais quando a corrente de carga é nula;
- Corrente de curto-circuito (I_{cc}): corrente quando os dois terminais são curto-circuitados (tensão terminal nula);
- Para cada ponto da curva $I \times V$, o produto $V \times I$ representa a potência gerada que atinge um máximo (P_{max}) num dado valor de tensão (V_{mp}) e de corrente (I_{mp});

2.3 TEORIA DE RASTREAMENTO SOLAR

Usualmente os painéis solares fotovoltaicos são posicionados num determinado ângulo em relação ao plano vertical e, durante o dia, a área de absorção varia em função do cosseno do ângulo de incidência da radiação solar, conforme esquematizado na Figura 6 (MOUSAZADEH et al., 2009)



S_0 - superfície horizontal;
 θ - ângulo de incidência; e
 $S_0 \cos \theta$ - área de absorção solar aparente.

Figura 6 - Área aparente de absorção solar em função do ângulo de incidência.

Portanto, o ângulo de incidência para absorção ótima ocorre quando a função $S_0 \cos \theta$ é máxima, ou seja, quando $\cos \theta = 1$ e, portanto, para $\theta = 0$.

O cálculo teórico para a energia solar captada por um sistema absorvedor considera que a intensidade máxima da radiação ($I = 1.100 \text{ Wm}^{-2}$) incide diretamente sobre a área de absorção aparente.

Supondo o tempo máximo possível diário de insolação como $t = 12 \text{ h} = 43.200 \text{ s}$ e, como dito anteriormente, a área de absorção será $S_0 \cos \theta$, em que $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ durante o dia. Então, tem-se pela Equação 2:

$$dW_{abs} = I \cdot S_{ap} \cdot dt \quad (2)$$

em que

- dW_{abs} = incremento de energia, [J];
- I = radiação máxima incidente, [Wm^{-2}];
- S_{ap} = área aparente, [m^2]; e
- dt = diferencial de tempo, [s].

Sabe-se, também, que a velocidade angular do sol movendo-se em relação à terra é dada pela Equação 3:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 7,27 \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

em que

$$\omega = \text{velocidade angular, } \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]; \text{ e}$$

$$T = \text{período, } [\text{s}].$$

Portanto, a quantidade de energia por unidade de área, durante um dia, para um painel solar fotovoltaico fixo pode ser obtida resolvendo-se as equações 2 e 3, obtendo-se o resultado expresso em 4.1:

$$W = \int_{-21600}^{21600} I \cdot S_0 \cdot \cos(\omega t) dt = I \cdot S_0 \left[\frac{\sin(\omega t)}{\omega} \right]_{-21600}^{21600} = \frac{2 \cdot I \cdot S_0}{\omega} \quad (4)$$

$$W = 3,03 \cdot 10^7 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} = 3,41 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \quad (4.1)$$

Enquanto que para um painel solar rastreador, para as mesmas condições, tem-se o resultado exposto em 5.

$$W = I \cdot S_0 \cdot t = 4,75 \cdot 10^7 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} = 13,2 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \quad (5)$$

Comparando os diferentes sistemas, observa-se incremento teórico de 57% da energia absorvida por um aparato que possui sistema de rastreamento solar.

Esse resultado pode ser aplicado, com precisão para satélites naturais e artificiais. Quando se trata de sistemas rastreadores posicionados na superfície terrestre, esse valor pode variar para mais ou para menos, de acordo com a nebulosidade local, reflexões diversas, índice de radiação, precisão do rastreamento, etc...

2.4 MÉTODOS DE RASTREAMENTO SOLAR

Painéis solares fotovoltaicos e concentradores solares funcionam mesmo que não estejam acoplados a mecanismos de adequação de posição, mas a utilização destes promove redução substancial no preço da energia gerada e possibilita a utilização de captadores com as mais diversas geometrias.

Por outro lado, devido à existência de partes móveis que ficarão expostas às intempéries, a manutenção e a instalação dos dispositivos necessários ao rastreamento

devem ser bem avaliadas para definir a necessidade ou não do mecanismo de posicionamento.

Segundo Kvasznicza & Elmer (2006), os rastreadores devem possuir uma ou mais das características abaixo:

- movimentação em uma ou duas direções;
- sensor de intensidade luminosa;
- autonomia energética ou fonte auxiliar de abastecimento;
- movimentação conforme a intensidade luminosa ou com passos pré-selecionados;
- rastreamento contínuo ou intermitente;

Os rastreadores se dividem, basicamente, em dois grupos, os passivos e ativos.

2.4.1 RASTREADORES PASSIVOS

Estes dispositivos dispensam o uso de motores, seu movimento ocorre em função da expansão/contração e eventualmente mudança de fase de um gás (usualmente freon).

Na sua montagem coloca-se um suporte acoplado a um eixo localizado exatamente no centro de uma barra móvel. Nas extremidades da parte móvel localizam-se reservatórios de gás. O sistema se equilibra quando há radiação direta igual nos dois lados da parte móvel. Conforme a intensidade muda, o sistema se adequa e posiciona-se perpendicularmente à radiação incidente.

Clifford & Eastwood (2004) apresentaram um modelo passivo de seguidor onde a parte móvel bimetálica constituída de alumínio e aço, contém em suas extremidades, anteparos de radiação que funcionam sombreando ou não o reservatório de expansão do gás, conforme ilustrado na Figura 7. De acordo com o movimento do sol, a diferença de massa dos reservatórios induz um torque que tende a manter a área de absorção praticamente perpendicular aos raios incidentes.

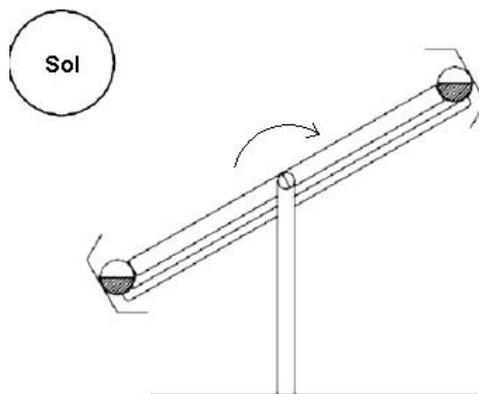


Figura 7 - Modelo de rastreador solar passivo proposto por Clifford & Eastwood em 2004.

Os modelos de rastreamento passivos são de fácil manutenção, possuem baixo custo e são boas opções para locais com baixa incidência de ventos. Os fatores negativos são:

- a construção exige eixos com baixíssimo atrito;
- a manutenção, apesar de simples, é constante;
- o sistema é facilmente influenciado por ventos, radiação difusa e pouso de aves na parte móvel;
- não funciona em dias de pouca radiação;
- movimenta-se em apenas um eixo.

Ao final do dia, os rastreadores passivos levam as placas para orientação referente à posição 18:00 horas, ou seja, praticamente vertical à face oeste, mas no início do dia a orientação necessária é vertical para o leste, então é necessária a movimentação para o leste todo início do dia, o que pode ser feito manualmente ou por meio de motores.

2.4.2 RASTREADORES ATIVOS

Sistemas de rastreamento ativo são baseados em dois princípios fundamentais que regem sua movimentação: rastreamento microprocessado e por sensoriamento eletro-óptico.

O sistema microprocessado baseia-se na ordem previamente estabelecida e não se modifica depois da implementação do algoritmo na unidade controladora. Geralmente esses sistemas utilizam um passo predeterminado no tempo, ou seja, num intervalo de “x” minutos o sistema se movimenta uma angulação “y” num dado sentido.

A movimentação pode ser em uma ou duas dimensões, não havendo limitações quanto ao passo de ajuste.

O sensoriamento eletro-óptico é baseado em informações instantâneas de luminosidade. Como característica, possui pelo menos um par de sensores fotossensíveis. Por meio da diferença de sinal entre os sensores o aparato faz uso da unidade motora, sob gerenciamento do microcontrolador, até que haja completo ajuste e, conseqüentemente, maximização da radiação incidente.

a) Métodos eletro-ópticos de rastreamento

Baseado na diferença de iluminação detectada pelos sensores fotoelétricos, as montagens utilizando o princípio do sombreamento são as mais utilizadas em todo o mundo pela facilidade, simplicidade de construção e por não haver limitação ao seu uso, uma vez que podem ser utilizadas tanto para movimentos unidimensionais quanto para bidimensionais.

Segundo Heredia et al. (2007) existem, basicamente, três mecanismos de sombreamento, como descritos a seguir.

Detector por placa opaca

Utiliza dois fotossensores posicionados paralelamente e entre eles uma placa opaca, ou opacitor, que fará sombra nos sensores de acordo com a posição do sol. O dispositivo acionará motores que igualarão a radiação incidente (Figura 8).

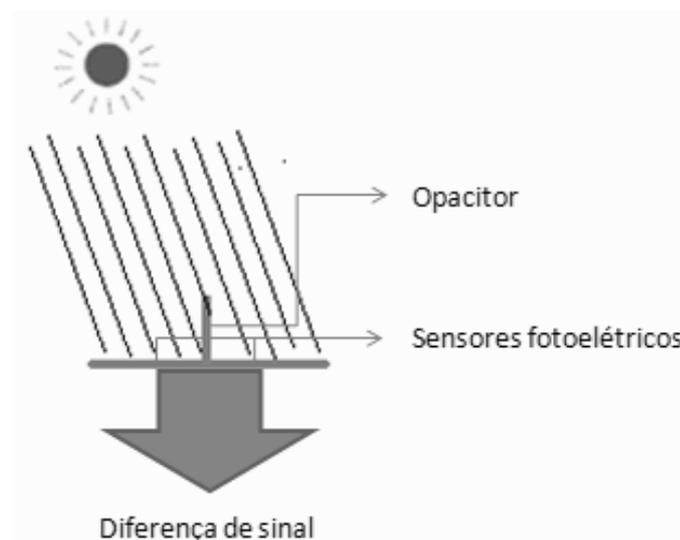


Figura 8 - Detector por placa opaca.

Montagem inclinada de sensores fotoelétricos

Tem-se a construção do aparato semelhante a uma pirâmide com detecção da intensidade da radiação em todas as faces. A intenção é igualar a radiação incidente nas faces para que o sistema aponte sempre na posição exata da radiação máxima incidente (Figura 9).

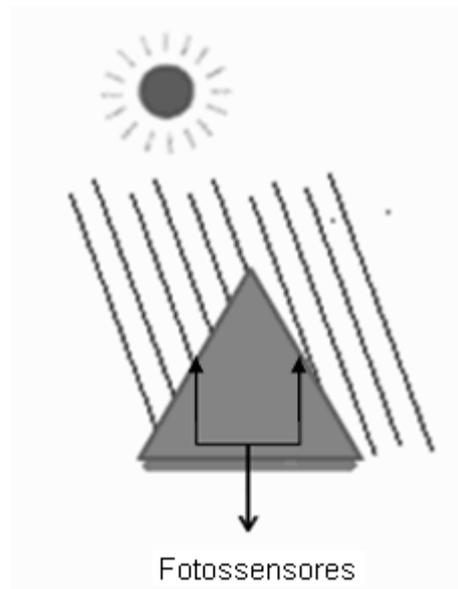


Figura 9 - Detector por montagem inclinada de sensores.

Detector por colimação

Nessa montagem, usualmente, um cilindro é utilizado como corpo opaco. O cilindro é dividido em quadrantes onde são posicionados os sensores fotoelétricos que farão a medição da intensidade luminosa (Figura 10).

É um método de fácil construção e aplicação, mesmo em locais com pouca luminosidade, uma vez que pode ser incorporada, na montagem do cilindro, uma lente que funcionaria como “amplificador de sinal”.

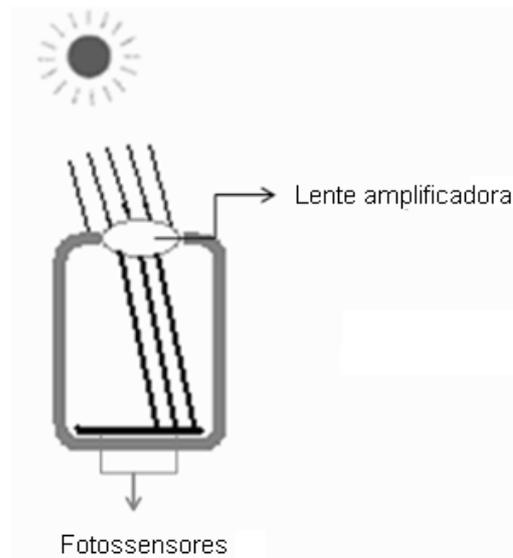


Figura 10 - Detector por colimação com lente amplificadora.

Basicamente todos os sistemas de posicionamento solar eletro-óptico utilizam em sua construção resistores LDR's baseados na experiência de Gagliano et al. (2006), que testaram um protótipo com dois eixos de rastreamento e compararam seus resultados com o sistema fixo. Na montagem do protótipo, foram utilizados doze sensores LDR's onde nove deles eram responsáveis pela rotação do sistema e somente três pela inclinação. A conclusão foi de que estes sensores, além do baixo custo, permitem precisão no processo de rastreamento.

Utilizando os mesmos sensores, Bakos (2006) desenvolveu um rastreador solar biaxial para uso com coletores solares. O sistema foi testado em condições de céu claro e obteve desempenho 46,5% maior que os sistemas fixos inclinados para latitude de 40°N.

b) Métodos de rastreamento utilizando tempo/dia

Nesses métodos, a nebulosidade do local é indiferente. Os detectores estão sempre apontando para o sol, mesmo que aquele não seja um ponto de iluminação máxima.

O sistema baseia-se na informação geográfica aliada à temporal e calcula, utilizando algoritmos de alta complexidade, a posição aparente do sol para cada dia do ano naquela região.

Nuwayhid et al. (2001) projetaram um rastreador acoplado à um aquecedor solar concentrador com dois eixos de movimentação em que estimava-se a posição do sol

utilizando o azimute e altura solar, baseado em equações dependentes do tempo. Obtiveram aumento na temperatura do fluido de circulação de até 600 °C em concentradores que operavam na faixa de 80 a 200 °C.

Abdallah et al. (2004) projetaram um sistema rastreador biaxial que estimava a posição do sol dividindo o arco solar em quatro partes, o sistema era capaz de gerenciar o passo do rastreamento de maneira diferente para cada motor, otimizando seu funcionamento. Obtiveram aumento de 41,3% na radiação solar captada à latitude 32°N, e otimizaram a vida-útil das unidades motoras.

O grande problema destes rastreadores é que, conforme aumenta-se a precisão do rastreamento, aumenta-se a exigência de processamento e, conseqüentemente, processadores mais potentes, que consomem mais energia e tempo são necessários para o desenvolvimento dos algoritmos computacionais.

Outro ponto negativo é que estes dispositivos não levam em consideração informações instantâneas de nebulosidade que podem, eventualmente, otimizar a captação. Em termos de eficiência, é mais indicada a utilização de rastreadores inteligentes. Porém, para aplicações em eixo único de movimentação, os métodos que utilizam o cálculo da posição aparente do sol proporcionam redução no custo de implantação, pois nestas condições equações mais simples podem ser utilizadas, o que pode viabilizar, para determinados locais, este tipo de rastreador.

Uma solução para os problemas anteriormente citados está nos dispositivos que associam sensores de radiação com algoritmos de cálculo da posição do sol. Esses aparatos auxiliam os mecanismos de localização no nascer e pôr do sol e podem, também, permitir ajustes somente nas redondezas da posição estimada do sol, isso diminui o tempo de adequação quando há elevada radiação direta.

Roth et al. (2004) construíram um seguidor solar biaxial para gerenciar o posicionamento de um pireliômetro. O dispositivo continha dois sensores de radiação que indicavam a intensidade e a posição do sol e auxiliavam na percepção do nascer e do pôr do sol. Os fotossensores enviavam as informações de melhor posicionamento para um computador portátil que fazia o ajuste para que, no dia seguinte, o sistema obtivesse melhor posicionamento na captação da radiação direta. Conseguiram, com este dispositivo, seguir o sol de acordo com os objetivos, porém foi necessário o acoplamento de uma unidade com alto desempenho em processamento de dados, o que pode dificultar sua utilização.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no laboratório de eletrônica e na área experimental de Energia na Agricultura e os dados foram tomados na cobertura do prédio principal do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais (latitude 20° 45' S e longitude 42° 52' W).

U sistema rastreador foi construído para funcionar com rastreamento biaxial e motorização exclusiva para cada grau de liberdade. O projeto foi elaborado de modo a facilitar a montagem, instalação e eventuais reparos pelo próprio usuário, cabendo ao operador simplesmente sua instalação numa região contemplada por radiação solar durante todo o dia, sem obstáculos ao entorno, e fazer a ligação do equipamento à rede elétrica da maneira adequada.

A energia gerada pelo painel fotovoltaico pode ser aproveitada da maneira que o usuário preferir, podendo ser conectada diretamente ao inversor para ser utilizada na rede elétrica ou ser armazenada em baterias com auxílio de controladores de carga, não havendo qualquer limitação imposta pelo sistema rastreador.

O equipamento foi composto por quatro partes, que funcionam integradas permitindo o correto desempenho do sistema (fotos da montagem são mostradas no Anexo A1). O detalhamento do material, projeto e construção de cada parte é descrito a seguir:

3.1 UNIDADE DE SENSORIAMENTO

A unidade de sensoriamento, responsável por receber as informações de radiação solar por meio de sensores fotossensíveis e repassá-las, analogicamente, para a unidade de processamento, foi construída com LDR's. Optou-se por utilizar uma montagem do tipo “placa opaca” por tornar o sistema mais robusto e simples de ser construído, evitando lentes que, além de possuir elevado preço, eventualmente podem ser quebradas ou aglomerar fungos, e comprometer o bom funcionamento. Por outro lado, exige severo controle e seleção dos componentes utilizados na prototipagem.

Com o objetivo de selecionar os LDR's, uma vez que podem variar ligeiramente a resposta para as mesmas condições de luminosidade, e isso pode prejudicar bastante o sensoriamento, desenvolveu-se um algoritmo computacional para testar grupos de fotorresistores submetidos, às mesmas condições de temperatura, umidade e

luminosidade. O software foi programado para realizar cerca de mil leituras a cada segundo de cada um dos componentes, que eram posicionados lado a lado de maneira coplanar e respondiam às mesmas fontes luminosas, cada um à sua maneira (Figura 11). Ao final da análise o programa identificava quais componentes obtiveram menor variabilidade entre si durante os testes. Esses componentes foram selecionados para a prototipagem.

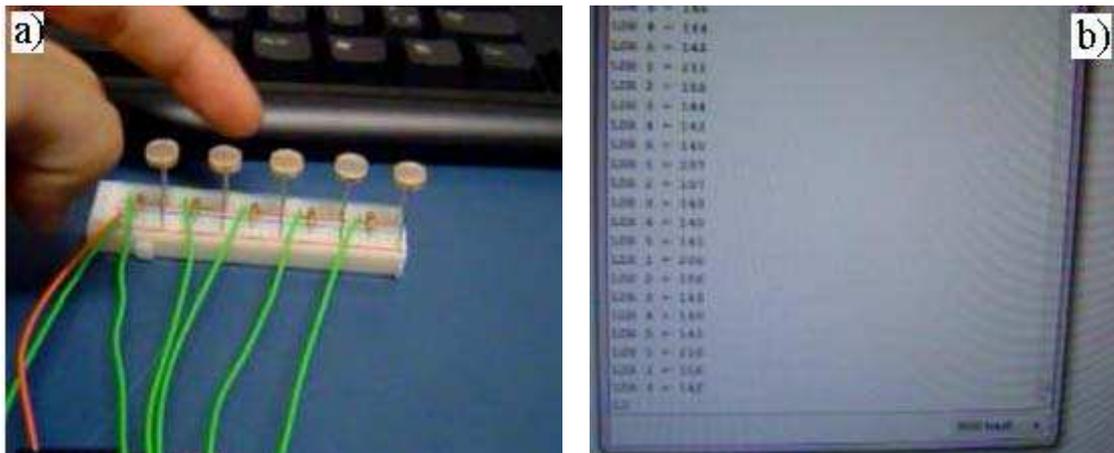


Figura 11 - Processo de seleção dos componentes utilizados na prototipagem: a) LDR's coplanares, b) tela de leitura dos dados.

Ainda visando a redução de custo, preservando a qualidade do rastreamento, resolveu-se eliminar um dos sensores LDR, o que resultou, também, na eliminação de um resistor.

Geralmente, os circuitos construídos com LDR's possuem dois pares de sensores, cada par respondendo por um dos eixos de movimentação. Ao eliminar um LDR fez-se com que o LDR central fosse compartilhado entre os LDR's das extremidades, o que possibilitou o escaneamento de ambos os eixos utilizando apenas três componentes fotossensíveis. Além disso, foram testadas três geometrias diferentes, retangular, circular e quadrada, para escolher a geometria que facilitasse o manuseio durante a prototipagem e o encaixe nas paredes da placa solar (Figura 12).



Figura 12 - Geometrias testadas para a unidade de sensoriamento: a) geometria retangular, b) geometria circular, c) geometria quadrada.

Escolheu-se a geometria quadrangular, projetou-se e construiu-se a unidade com arestas de 5cm de lado e altura de 5cm, que depois de montada apresentou-se como mostrado na Figura 13 c).

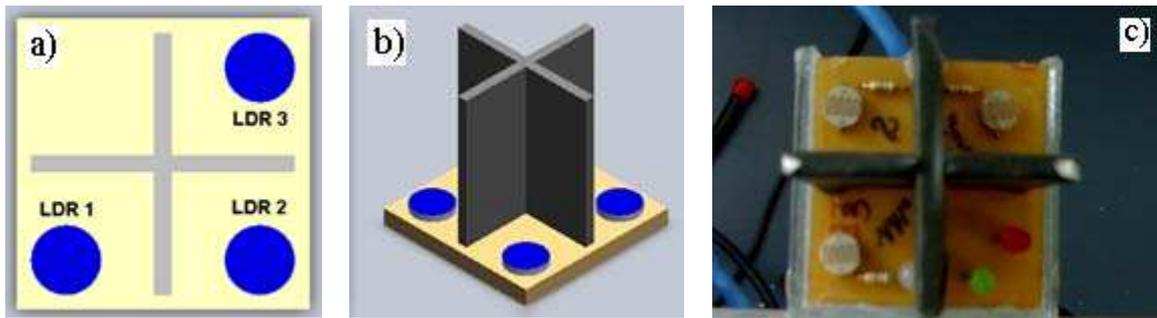


Figura 13 - Projeto e construção da unidade de sensoriamento: a) visão superior na fase de projeto, b) visão trimétrica na fase de projeto, c) unidade construída.

Testaram-se cinco tamanhos diferentes de sensores LDR (5, 9, 12, 20 e 25mm). Os LDR's de 5, 9 e 12mm foram selecionados e utilizados na construção de três circuitos para testes. Para a coleta dos dados, a placa utilizada continha sensores de 9 mm.

No circuito desenvolvido, a luminosidade detectada pelos fotorresistores das extremidades eram comparados com o central, de maneira que se houvesse diferença de sinal entre um par, haveria movimento em um eixo e assim por diante até que os sinais fossem igualados. O sistema era capaz de escolher o movimento comparando os gradientes de luminosidade de cada eixo e atuando no que apresentasse maior valor. Enquanto modificava a posição, a unidade de gerenciamento monitorava os sinais para garantir que somente uma unidade motora fosse ativada por vez e que o menor caminho fosse percorrido até a posição de alinhamento ideal.

A sensibilidade de cada componente poderia ser amplificada ou reduzida conforme se desejava aumentar ou diminuir a precisão do rastreamento, quanto mais preciso maior seria o uso das unidades motoras que seriam exigidas a todo instante para fazer pequenos ajustes. Optou-se, durante os testes preliminares, por permitir variações da ordem de 0,3% nos sinais dos fotodetectores, posteriormente para a coleta de dados permitiu-se 0,7%.

As informações foram transmitidas por cabos e conectores tipo “RJ 45” (Figura 14), por possuírem a quantidade adequada de fios para conexão, serem de fácil manipulação, acoplamento, e possuir alta confiabilidade.

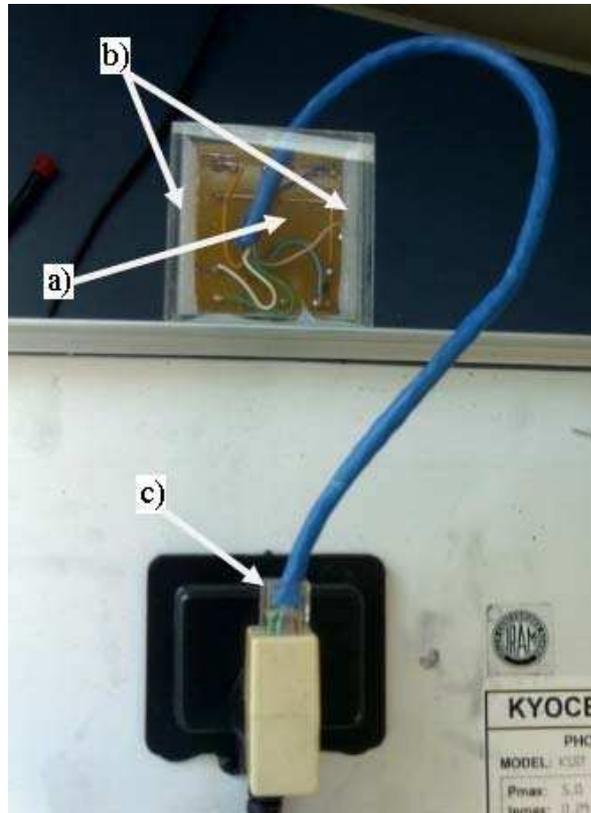


Figura 14 – Unidade de sensoriamento acoplada à placa solar: a) isolamento em vidro, b) detalhes do vedamento com silicone, c) conector tipo “RJ 45”.

A unidade de sensoriamento foi confeccionada utilizando-se fotossensores e resistores montados sobre uma placa de circuito impresso. Para proteger os componentes das intempéries, o conjunto foi montado em uma caixa de vidro vedada com silicone.

3.2 UNIDADE DE MOVIMENTAÇÃO

A unidade de movimentação foi constituída por 2 servo-motores apropriados para interagirem com o processador sem a necessidade de circuitos auxiliares, engrenagens e relés, para evitar manutenção com desgaste de componentes e desperdício de energia. Cada motor ficou responsável pela movimentação de um eixo.

Os motores (Figura 15) foram alimentados por uma tensão de 12Vcc fornecida pela alimentação da placa de processamento. O conector utilizado também foi do tipo “RJ 45” com apenas um conector para ambas as unidades motoras. Essa opção se deve ao fato do trabalho estar voltado para o emprego em sistemas fotovoltaicos para uso em residência e montagem pelo próprio usuário.



Figura 15 - Unidade de motorização em destaque.

Os motores utilizados apresentam torque de 63,77 N.cm. Utilizou-se placas fotovoltaicas KYOCERA, modelo KC5, potência nominal de 5Wp, com dimensões de 35 x 20cm e massa de aproximadamente 1,4kg.

Para reduzir o esforço dos motores na movimentação da placa solar, utilizou-se um eixo central longitudinal, construído com rolamentos. Hiperdimensionou-se as unidades motoras pois além da placa fotovoltaica houve a necessidade de movimentar um piranômetro de monitoramento da radiação direta do plano móvel.

3.3 UNIDADE DE PROCESSAMENTO

A unidade de processamento foi responsável pelo controle e gerenciamento de todo o sistema rastreador. Neste módulo foram conectadas, por meio de cabos com multicamadas de fiação interna, as demais unidades.

O microcontrolador processava as informações dos fotodetectores para posterior envio da informação à unidade de movimentação. Foi também responsável pela alimentação da unidade de sensoriamento.

O microcontrolador utilizado foi o ARDUINO/ATMEGA328P, por facilitar a introdução de rotinas de programação, possuir capacidade satisfatória de processamento, velocidade de clock de 16MHz, 32Kb de memória flash e disponibilidade de acoplamento de novos componentes caso necessário (Figura 16).



Figura 16 - Microcontrolador ARDUINO/ATMEGA328P.

As informações para a correção da posição foram selecionadas levando-se em conta, os seguintes fatores:

- Se a diferença de sinal seria superior a 0,7%, suficiente para melhorar o desempenho da placa solar; e
- Caso fosse necessário realizar ajustes, qual seria o maior gradiente de luminosidade para seleção do melhor caminho?

Via software, foram implementadas rotinas de racionalização de funcionamento, por exemplo, evitando que os dois motores trabalhassem concomitantemente, demandando, maior corrente para alimentação, o que poderia gerar problemas de ruído.

3.4 UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO

Optou-se por adotar uma unidade específica para alimentação, pois a energia exigida pelo sistema rastreador deveria ser, necessariamente, proveniente de uma fonte de corrente contínua com tensão na faixa de 6 a 20 Vcc e durante todo o tempo. A alimentação poderia ser fornecida pelo próprio sistema fotovoltaico, caso houvessem

baterias conectadas, ou por qualquer outro sistema, desde que satisfizessem essas exigências.

Portanto, para a coleta dos dados experimentais deste projeto, foi utilizada como fonte de alimentação a rede elétrica disponível no local de realização do experimento, estabilizada com uma fonte chaveada de 12 Vcc (Figura 17).



Figura 17 - Fonte de alimentação utilizada no experimento.

O diagrama apresentado na Figura 18 exhibe as unidades do rastreador, e as setas o fluxo de informações entre as unidades.

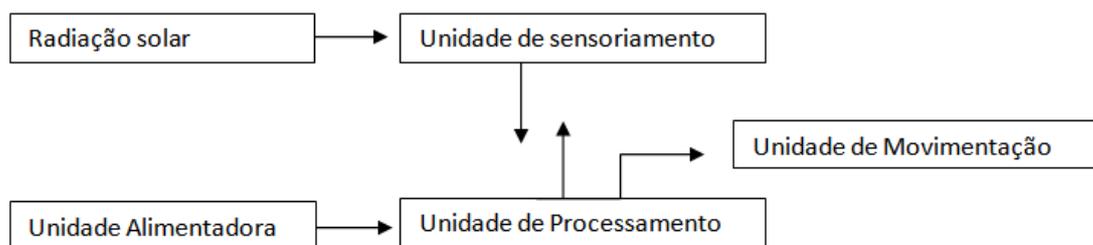


Figura 18 - Esquema de funcionamento harmonizado do rastreador.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados na cobertura do prédio principal do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Os resultados foram comparados com o sistema fixo inclinado de acordo com a latitude local ($20^{\circ}45'$).

A potência gerada pelo painel foi calculada medindo-se a corrente que atravessava um resistor de precisão. Com as leituras de corrente, utilizou-se a equação (6) para determinação da potência extraída.

$$P = R \cdot I_r^2 \quad (6)$$

em que

P = potência, [W];
R = resistência, [Ω]; e
= corrente, [A];

I_r

Para a realização do experimento foram testados vários resistores com valores diferentes de resistência, e dentre as possibilidades optou-se pela utilização de resistores de precisão com $47,5 \Omega \pm 1\%$ por terem apresentado, em relação aos outros, os maiores valores de potência fornecida pelos módulos solares.

Os valores da potência do módulo rastreado e do módulo fixo foram plotados no gráfico de potência por tempo, calculou-se a área sob a curva, pelo método dos trapézios, a fim de se obter a energia gerada para determinação do ganho percentual do sistema rastreador em relação ao sistema fixo.

Um microcomputador foi utilizado para armazenar os dados coletados em intervalos de 10 minutos e salvá-los numa pasta específica. O intervalo de dez minutos foi escolhido por possibilitar maior detalhamento do desempenho do rastreador. Usualmente utiliza-se intervalos de trinta minutos, como observado em Bakos (2006) e Abdallah et al. (2004) (Figura 19 a e b), respectivamente.

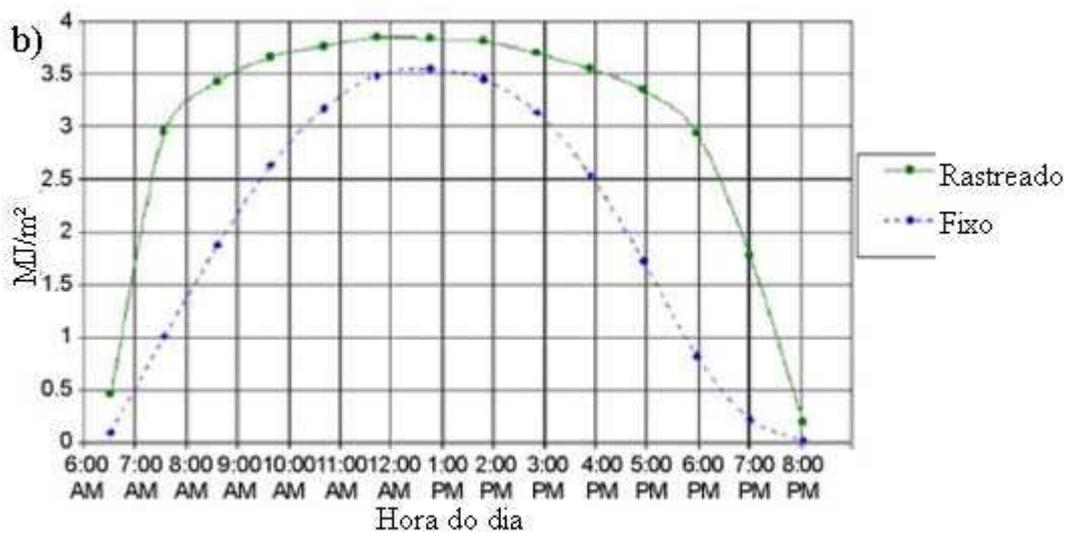
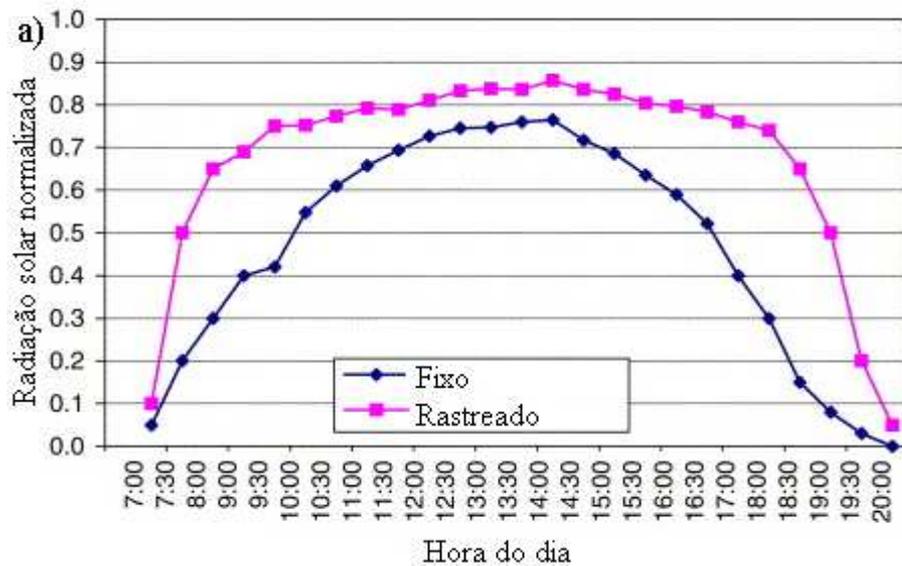


Figura 19 - Desempenho de um sistema rastreador: a) segundo Bakos (2006), e b) segundo Abdallah et al. (2004).

Cronometrou-se, via software, o tempo de utilização de ambos os motores e a energia consumida pela unidade de movimentação foi posteriormente calculada (Anexo A3).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a seleção das geometrias para prototipagem da unidade de sensoriamento, descartou-se a geometria circular pelo fato da mesma dificultar a manipulação durante a prototipagem e por acoplar-se de maneira instável à borda da placa fotovoltaica. Outro problema observado foi o excesso de resíduos de bordas e

pedaços de fenolite durante o corte, algo que se tornaria um problema para a fabricação em larga escala.

As geometrias, retangular e quadrada, foram igualmente bem fixadas e facilmente manipuladas, apresentando desempenhos similares, porém, a geometria quadrada foi preferida por apresentar simetria dos lados o que facilitaria a localização dos componentes, uma vez que os fotorresistores das extremidades devem ficar igualmente distantes do fotorresistor central.

Foram testados LDR's de 5, 9, 12, 20 e 25 mm, todos do mesmo fabricante, e importados diretamente da China. Analizou-se a homogeneidade (menor variabilidade na resposta da luminosidade), preço e a sensibilidade para um universo de 20 sensores de cada tipo, atribuindo peso três para homogeneidade, peso dois para o preço e peso um para a sensibilidade. Esses pesos representam a importância de cada um destes itens, e multiplica a nota de cada parâmetro. Atribui-se nota zero para o pior e nota 1 para o melhor componente em cada parâmetro, as outras notas foram proporcionalmente calculadas.

A homogeneidade é tida como a mais importante, pois os sensores mais heterogêneos apresentariam alto descarte durante o processo de produção, o preço é mediamente importante, pois não afeta demasiadamente o custo associado à unidade de sensoriamento. A sensibilidade tem grau de importância proporcionalmente menor, pois pode ser facilmente manipulada via programação.

Os resultados das análises dos LDR's são exibidos na Tabela 2:

Tabela 2 - Resultados da análise para os diferentes tamanhos de sensores de acordo com os parâmetros propostos

Tamanho do LDR (mm)	Homogeneidade(%)	Preço (R\$*)	Sensibilidade (0-5)	Nota final
5	90	0,08	1	5,00
9	90	0,12	2	5,19
12	75	0,24	3	4,21
20	55	0,72	4	2,27
25	45	1,2	5	1,00

* Câmbio: 1 USD = R\$ 1,60.

Portanto, optou-se por utilizar sensores de 9 mm na construção da unidade de sensoriamento, resultando em desempenho satisfatórios para o qual foi projetada, além disso não apresentou qualquer problema com mal contato e suas conexões do tipo “plug

& play” demonstraram alta confiabilidade para as mais diversas condições de tempo em que o sistema funcionou.

O sistema rastreador ficou montado e hábil à coleta de dados por aproximadamente setenta dias (5 de novembro de 2010 a 15 de janeiro de 2011), porém, nem todos os dias foram realizadas medições por consequência das fortes chuvas dos meses de dezembro e janeiro que inviabilizaram a utilização dos aparelhos para coleta de dados e tornava perigoso o local onde o trabalho estava sendo realizado.

Em alguns dias foram realizadas medições com tempo chuvoso e vento, e mesmo nessas condições o equipamento se comportou de maneira bastante satisfatória, não sofrendo oscilações e desalinhamentos que afetassem o funcionamento. Durante todo o período não houve necessidade de ajuste mecânico e de manutenção e não se observou degradação da unidade. As conexões não apresentaram ruído nem mau contato.

O único ajuste feito em todo o período, foi com relação à precisão de rastreamento que inicialmente estava programada para rastrear mudanças a partir de 0,3% na diferença de sinais, isso estava exigindo excessivamente as unidades motoras, a tolerância foi aumentada para 0,7% e observou-se melhora na utilização dos motores, no entanto, estudos mais específicos para a tolerância da histerese de rastreamento são requeridos.

Devido à ampla variedade de perfis das curvas de potência encontradas durante todo o período de coleta de dados, optou-se por apresentar os resultados de acordo com os padrões de condição climática, dividindo os resultados em dois grupos, o primeiro com condições perturbadas de insolação (presença de nuvens densas e chuvas) e o segundo grupo com condições boas de insolação (ausência total ou quase total de nuvens).

4.1 DESEMPENHO SOB CONDIÇÕES PERTURBADAS DE INSOLAÇÃO

Na Figura 20, pode se observar o desempenho do painel fotovoltaico móvel e fixo para o dia 18 de novembro de 2010, onde se observa claramente a maior eficiência propiciada pelo mecanismo de rastreamento. As setas demonstram horários do dia em que houveram precipitações pluviométricas e, em seguida, estiagem. Durante as chuvas

a captação teve uma queda brusca, pois o tempo ficou demasiadamente escuro com nuvens densas encobrindo o sol.

Observa-se que mesmo em condições perturbadas de insolação o padrão das curvas obedece ao padrão observado na Figura 19 que é típico de sistemas rastreadores. As oscilações mais acentuadas da curva de rastreamento da Figura 20, se devem ao intervalo de coleta de dados que garante maior detalhamento em função do tempo.

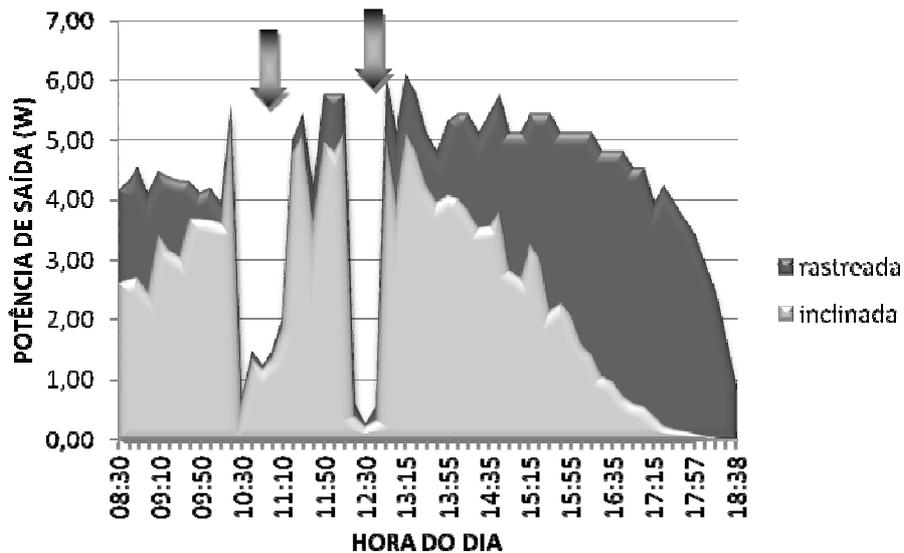


Figura 20 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 18/11/2010.

Na figura 21, referente ao dia 19 de novembro de 2010, as potências registradas apresentaram no período da manhã um padrão mais homogêneo de irradiância com chuvas rápidas logo após as 13h (em destaque) e na parte da tarde foram observadas nuvens densas durante alguns momentos.



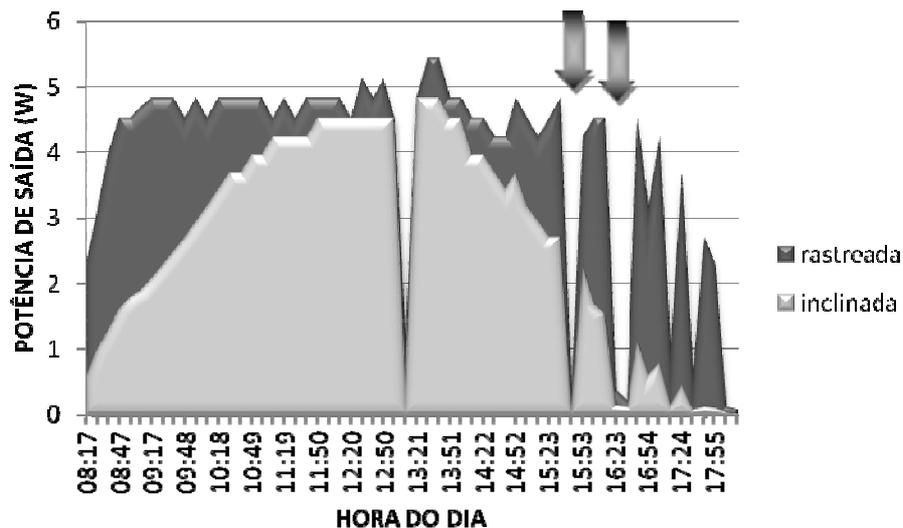


Figura 21 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 19/11/2010.

Na Figura 22 observou-se presença de nuvens durante o período da manhã, algo que não se repetiu durante o período da tarde em que se observou céu claro com boa irradiância. Observou-se à tarde que o sistema rastreador apresentou potência de geração superior ao sistema fixo.

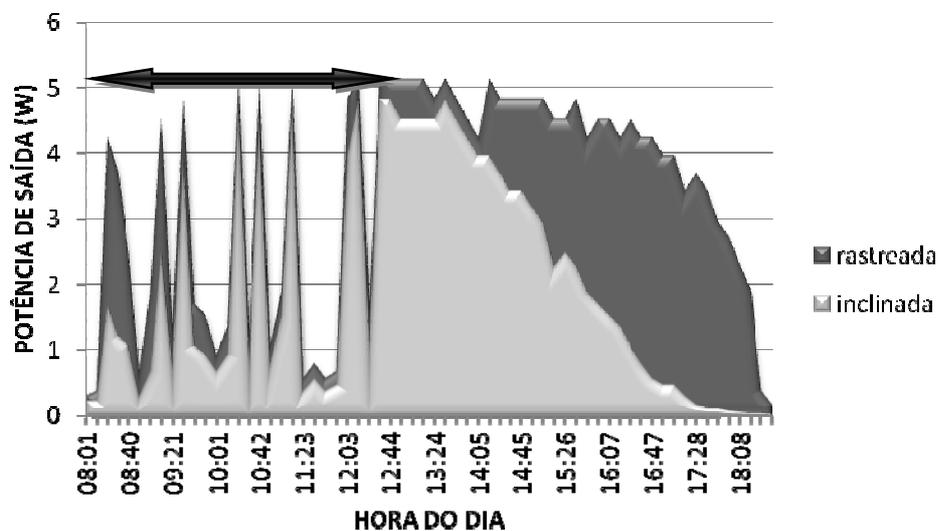


Figura 22 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 20/11/2010.

No dia 10/12/2010, Figura 23, as condições de insolação foram afetadas pela alta e densa nebulosidade durante todo o dia, com rápidas precipitações pela manhã e início da tarde. Observou-se alguns picos de iluminância que desencadearam alta potência de geração, isso pode ter sido favorecido pelo resfriamento dos módulos

propiciado pelas chuvas, uma vez que a baixa temperatura potencializa o rendimento de módulos solares.

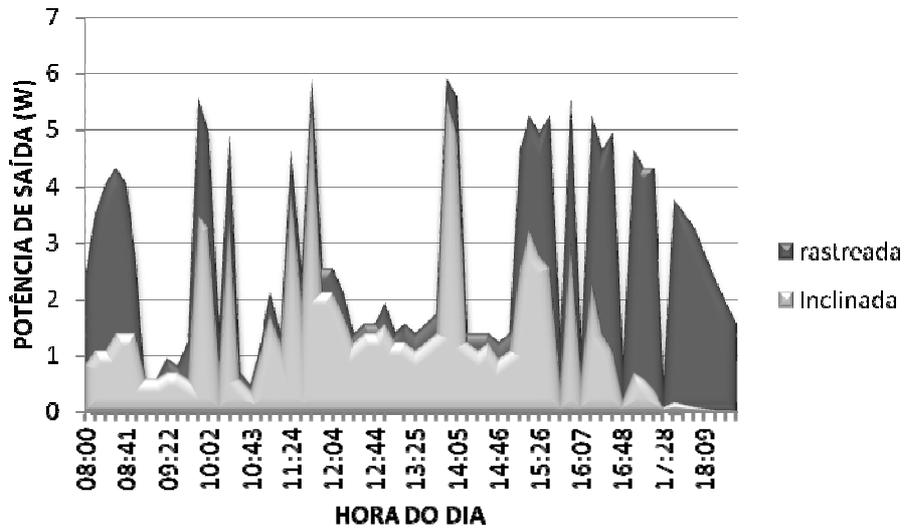


Figura 23 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 10/12/2010.

Para o dia 11/12/2010, Figura 24, não foram observadas precipitações, no entanto a nebulosidade foi muito parecida com a do dia anterior, raros momentos de insolação que rapidamente eram escondidos por nuvens, fazendo com que a potência gerada pelos sistemas apresentasse vários picos ao longo do dia.

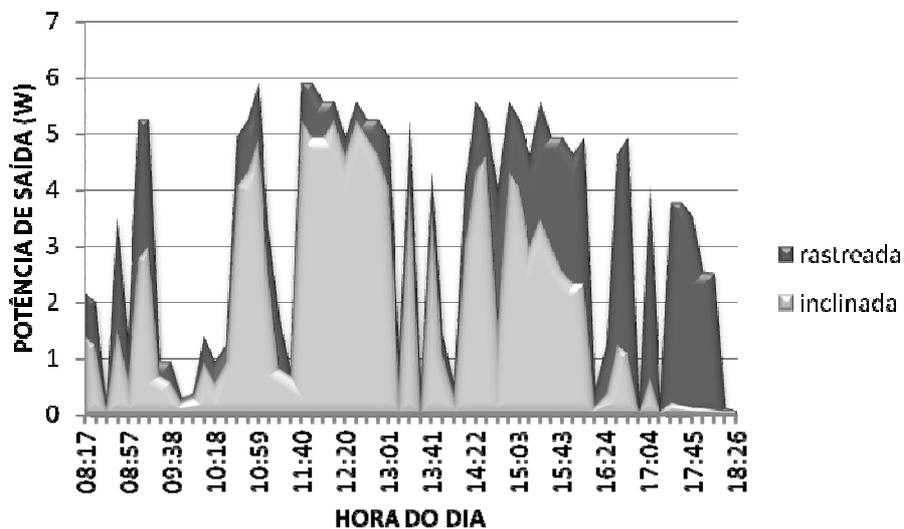


Figura 24 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 11/12/2010.

Os resultados para o dia 13/12/2010, Figura 25, demonstram céu parcialmente claro na parte da manhã e algumas formações de nuvens no início da tarde que

evoluíram para densas nuvens e chuvas rápidas ao final da tarde. O tempo se manteve nebuloso por toda a tarde.

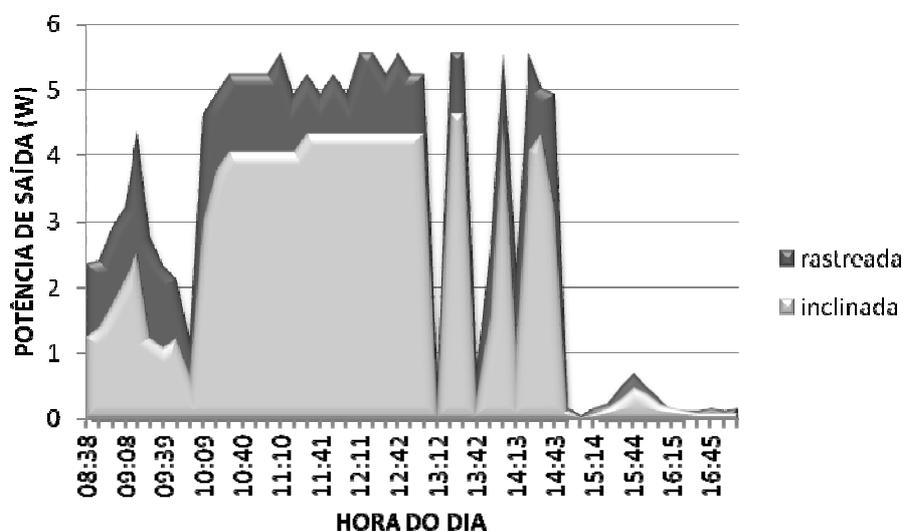


Figura 25 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 13/12/2010.

À seguir, apresenta-se na forma de Tabela, o resumo quantitativo do desempenho do sistema rastreador para os dias com nebulosidade:

Tabela 3 - Valores quantitativos para o período de insolação perturbada.

Dia	Energia gerada pelo sistema inclinado (W.h)	Energia gerada pelo sistema rastreador (W.h)	Ganho bruto de energia (%)	Gasto com movimentação (W.h)	Percentual energético gasto com movimentação (%)	Ganho líquido de energia (%)
18/11/2010	25,61	41,81	63,3	2,42	5,78	53,8
19/11/2010	27,01	40,03	48,2	2,24	5,59	39,9
20/11/2010	21,50	35,82	66,6	2,32	6,47	55,8
10/12/2010	16,25	30,44	87,3	2,07	6,80	74,6
11/12/2010	21,64	33,46	54,6	1,97	5,88	45,5
13/12/2010	19,92	26,65	33,8	1,54	5,77	26,1
MÉDIA	21,99	34,70	58,9	2,09	6,02	49,3

O percentual energético gasto com movimentação dependeu da nebulosidade, já que quando há maior nebulosidade o sistema fica buscando e ajustando mais vezes e consequentemente gasta mais energia, porém não se observou gasto excessivo já que o

rastreador hibernava quando não localizava diferença significativa de luminosidade para justificar a movimentação.

O ganho bruto de energia da ordem de 58% é amenizado pelo gasto energético com movimentação do sistema, isso pode ser consequência do hiperdimensionamento das unidades motoras e da precisão do rastreo. Estudos de otimização e gerenciamento do uso das unidades motoras poderiam otimizar ainda mais o sistema de rastreamento proposto.

4.2 DESEMPENHO SOB BOAS CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO

Durante todo o período de coleta de dados observou-se raros dias de céu totalmente claro, isso se deve às características climáticas da Zona da Mata Mineira durante os meses de novembro, dezembro e janeiro.

O dia 12/12/2010, apresentou um dos melhores padrões de insolação ao longo do dia, observou-se céu claro com ausência praticamente total de nuvens. Não observou-se precipitação. As potências geradas apresentaram comportamento típico da geração de energia por painéis fotovoltaicos em condições de céu claro sem nebulosidade (Figura 26).

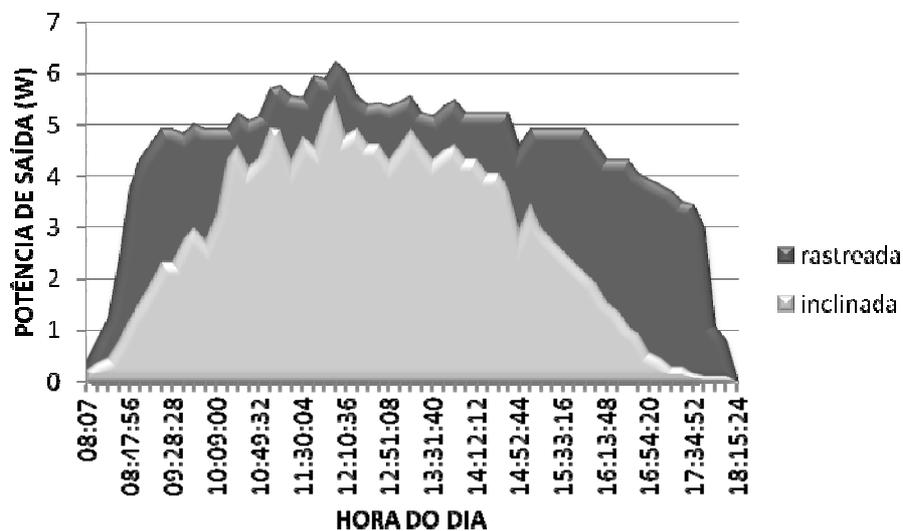


Figura 26 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 12/12/2010.

Para o dia 21/12/2010 as condições de insolação foram igualmente boas, o que levou à obtenção de resultado semelhante ao do dia anterior (Figura 27).

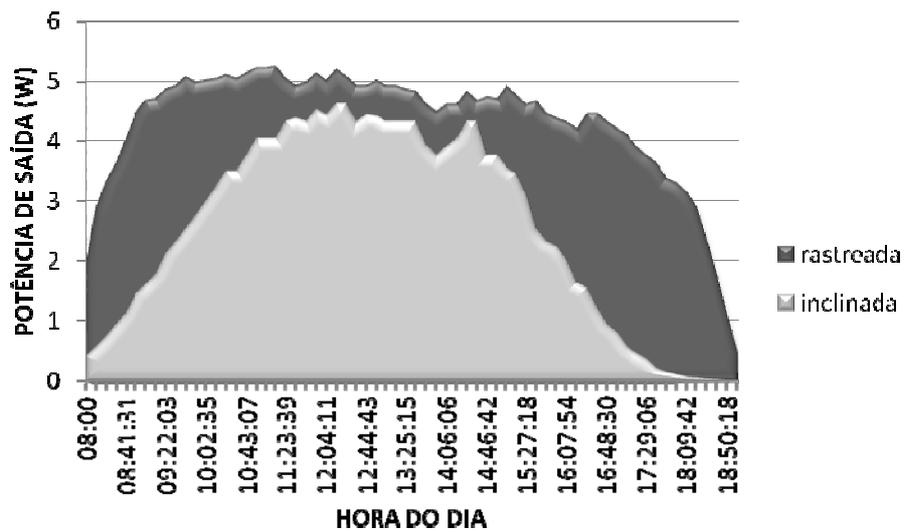


Figura 27 - Comparação entre o painel rastreado e o fixo para o dia 21/12/2010.

Apresenta-se na Tabela 4, o resumo quantitativo do desempenho do sistema rastreador para os dias com boa insolação:

Tabela 4 - Valores quantitativos para o período de boa insolação

Dia	Energia gerada pelo sistema inclinado fixo (W.h)	Energia gerada pelo sistema rastreador (W.h)	Ganho bruto de energia (%)	Gasto com movimentação (W.h)	Percentual energético gasto com movimentação (%)	Ganho líquido de energia (%)
12/12/2010	29,02	45,43	56,55	2,23	4,90	48,9
21/12/2010	28,10	47,48	68,96	2,47	5,20	60,2
MÉDIA	28,56	46,46	62,76	2,35	5,05	54,4

Observam-se diferenças entre os resultados do percentual energético gasto com movimentação para os dias com boas condições de insolação (5,05%) em relação aos dias com insolação perturbada (6,02%), isso se deve à inexistência de nuvens que exige menos ajustes na posição, consequentemente o ganho líquido de energia aumenta.

O ganho bruto de energia de 62,7% foi superior ao obtido por Abdallah et al. (2004), Bakos (2006), Sungur (2009) e Huang et al. (2011). A diferença frente aos resultados aqui obtidos pode ser consequência da precisão do rastreamento, da latitude, da qualidade da radiação solar local e da temperatura de operação dos módulos.

Os trabalhos de Sungur (2009) transcorreram na Turquia, 37,6°N obtendo rendimento 42,6% superior ao sistema fixo, seus resultados podem ter sido influenciados pela escolha em utilizar o método de rastreamento que utiliza cálculos da posição aparente do sol, no algoritmo de posicionamento solar, associado às informações instantâneas de luminosidade. Entende-se que o sistema de rastreamento solar utilizando exclusivamente as informações instantâneas de luminosidade apresenta maior potencial de otimização das placas solares.

Huang et al. (2011) desenvolveram seus trabalhos em Taiwan, 25°N, e obtiveram rendimentos 23,6% superiores aos sistemas fixos. Seu sistema de rastreamento, no entanto, é baseado na correção uniaxial da posição, o que tende a diminuir a precisão do rastreo e propiciar menor ganho energético. Atualmente os sistemas de rastreamento biaxial estão se tornando viáveis à medida que o preço dos componentes eletrônicos diminui.

O aumento líquido médio de energia dos dias sem nebulosidade (54,4%), em relação aos dias com nebulosidade (49,3%), pode ser explicado pelos elevados níveis de insolação direta e da menor exigência do uso dos motores.

Tabela 4 - Valores quantitativos para o período de boa insolação

Dia	Energia gerada pelo sistema inclinado fixo (W.h)	Energia gerada pelo sistema rastreador (W.h)	Ganho bruto de energia (%)	Gasto com movimentação (W.h)	Percentual energético gasto com movimentação (%)	Ganho líquido (%)
12/12/2010	29,02	45,43	56,55	2,23	4,90	48,9
21/12/2010	28,10	47,48	68,96	2,47	5,20	60,2
MÉDIA	28,56	46,46	62,76	2,35	5,05	54,4

Observam-se diferenças entres os resultados do percentual energético gasto com movimentação para os dias com boas condições de insolação (5,05%) em relação aos dias com insolação perturbada (6,02%), isso se deve à inexistência de nuvens que exige menos ajustes na posição, consequentemente o ganho líquido de energia aumenta.

O ganho bruto de energia de 62,7% foi superior ao obtido por Abdallah et al. (2004), Bakos (2006), Sungur (2009) e Huang et al. (2011). A diferença frente aos resultados aqui obtidos pode ser consequência da precisão do rastreamento, da latitude, da qualidade da radiação solar local e da temperatura de operação dos módulos.

Os trabalhos de Sungur (2009) transcorreram na Turquia, 37,6°N obtendo rendimento 42,6% superior ao sistema fixo, seus resultados podem ter sido influenciados pela escolha em utilizar o método de rastreamento que utiliza cálculos da posição aparente do sol, no algoritmo de posicionamento solar, associado às informações instantâneas de luminosidade. Entende-se que o sistema de rastreamento solar utilizando exclusivamente as informações instantâneas de luminosidade apresenta maior potencial de otimização das placas solares.

Huang et al. (2011) desenvolveram seus trabalhos em Taiwan, 25°N, e obtiveram rendimentos 23,6% superiores aos sistemas fixos. Seu sistema de rastreamento, no entanto, é baseado na correção uniaxial da posição, o que tende a diminuir a precisão do rastreamento e propiciar menor ganho energético. Atualmente os sistemas de rastreamento biaxial estão se tornando viáveis à medida que o preço dos componentes eletrônicos diminui.

O aumento líquido médio de energia dos dias sem nebulosidade (54,4%), em relação aos dias com nebulosidade (49,3%), pode ser explicado pelos elevados níveis de insolação direta e da menor exigência do uso dos motores.

5 CONCLUSÕES

- Planejou-se, construiu-se e analisou-se para as condições geográficas de Viçosa – MG, um sistema rastreador solar biaxial com lógica pré-programada e conexões do tipo plug & play, visando o consumidor residencial e a produção em larga escala, cujos resultados levaram às seguintes conclusões:

- O sistema rastreador atendeu os objetivos propostos, não sendo observado dano eletro-mecânico enquanto o equipamento ficou exposto a ventos e chuvas durante a coleta de dados;

- O sistema apresentou a robustez exigida para, mesmo em condições adversas de tempo, não desviar da posição de máxima irradiância;

- A unidade de sensoriamento eletro-óptico com três sensores LDR's mostrou-se apropriada para utilização em sistemas de rastreamento;

- A rastreabilidade foi influenciada pelo grau de precisão, não se recomendando precisão inferior a 0,7% entre os sinais dos fotossensores;

- O rastreador biaxial permitiu ganho na energia gerada pelos painéis fotovoltaicos tanto em condições perturbadas de insolação quanto em boas condições de insolação;

- O sistema construído não requer, para sua instalação, conhecimento especializado pelo usuário, possuindo potencial para uso doméstico e industrial;

- Para a latitude de Viçosa – MG, pode-se otimizar em mais de 50% o aproveitamento de placas fotovoltaicas acopladas em mecanismos de rastreamento solar.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

As sugestões seguintes são propostas para aprimorar este trabalho:

- i. Estudar o desempenho do rastreador solar ao longo de todo o ano em diferentes pontos de latitude e condições climatológicas;
- ii. Analisar a viabilidade de seu uso em embarcações que eventualmente exijam maiores cuidados com deterioração e lubrificação das partes móveis;
- iii. Construir o sistema proposto para utilização em sistemas de maior potência;
- iv. Otimizar as unidades motoras em função do grau de precisão do rastreamento.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

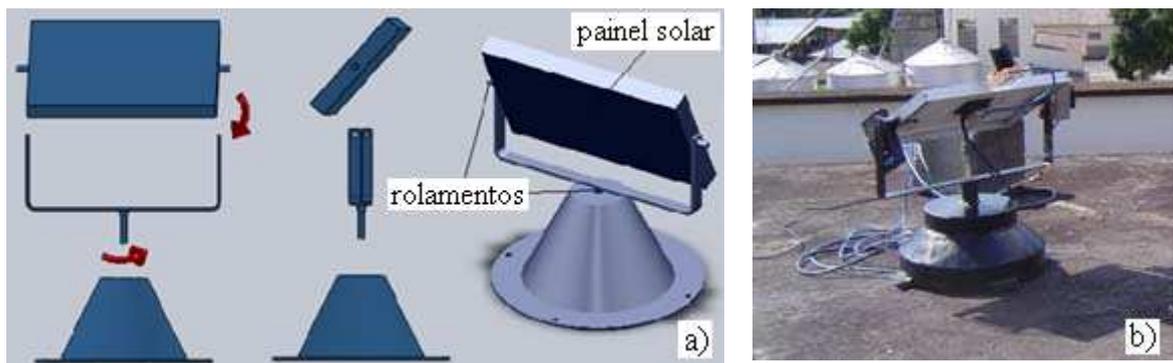
- ABDALLAH, S, NIJMEH, S. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management*, v. 45, p. 1931-1939, 2004.
- ACEVEDO, A. M., Can we improve the record efficiency of CdS/CdTe solar cells?, *Solar Energy Materials and Solar Cells* v 90 p 2213-2220, 2006.
- BAKOS, G. C. Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, v.31, p. 2411-2421, 2006.
- BEN - Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética – Ministério de Minas e Energia. 2010. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENResultadosPreliminares2010.aspx>. Acesso em: 20 maio, 2010.
- CALTECH - California Institute of Technology. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization. April 18-21, 2005.
- CASTRO R. M. G., *Energias renováveis e produção descentralizada: introdução a energia fotovoltaica*, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.
- CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy* v 77 p 269–280, 2004.
- DORADO E. D, GARCÍA A. S, CARRILLO, C. J, CIDRÁS, J. Optimal distribution next term for previous term photovoltaic solar trackers to minimize power losses caused next term by previous term shadows. *Renewable Energy*, v.36, p. 1826-1835, 2011.
- FISCHER, J. R.; BUCHANAN, G. Developing solar power, *Resource: Engineering and Technology for a Sustainable World*. May/June p 14-17, 2010.
- FLOOD, M., *Solar cells, Design and Innovation*, Open University Press (1986) 56p.
- GAGLIANO, S.; SAVALLI, N.; TINA, G.; PITRONE, N. Two-axis sun tracking system: design and simulation, *Eurosun 2006 Glasgow, UK, June 27–30 (2006)*.

- HEREDIA, I. L.; MORENO, J. M.; MAGALHAES, P. H.; CERVANTES, R.; QUÉMÉRÉ, G.; LAURENT, O.; Inspira's CPV sun tracking (concentrator photovoltaics). Springer; p. 221–51, 2007.
- HUANG, B. J.; DING, W. L.; HUANG, Y. C. Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker. *Solar Energy*, 2011 (doi:10.1016/j.solener.2011.05.001).
- KVASZNICZA, Z; ELMER, G. Optimizing solar tracking systems for solar cells, The 4th Serbian–Hungarian joint symposium on intelligent systems Subotica, Serbia, September 29–30 (2006).
- MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBILI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v 13(8) p 1800-1818, 2009.
- NUWAYHID, R.Y.; MRAD, F.; ABU-SAID, R. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications, *Renewable Energy* v 24 p 207–222, 2001.
- ROTH, P.; GEORGIEV, A.; BOUDINOV, H. Design and construction of a system for sun-tracking, *Renewable Energy* v 29 p. 393–402, 2004.
- SEXTON, S., RAJAGOPAL, D., ZILBERMAN, D. Y ROLAND-HOLST, D. The intersections of energy and agriculture: implications of rising demand for biofuels and the search for the next generation. *Agricultural and Resources Economics Update*, 10(5): 4–7, 2007.
- SUNGUR, C. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. *Renewable Energy* v 34 p. 1119-1125, 2009.
- TOLEDO, O. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; DINIZ, A. S. A. C. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v 14(1). p 506-511. 2010.
- USDOE - World Oil Balance. United State Department of Energy. 2009. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/oilother.html>. Acesso em: 10 mar., 2010.
- USEIA - Emissions of Greenhouse Gases Report. United State Energy Information Administration. 2009. Disponível em <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/index.html>. Acesso em: 27 Abr., 2010.

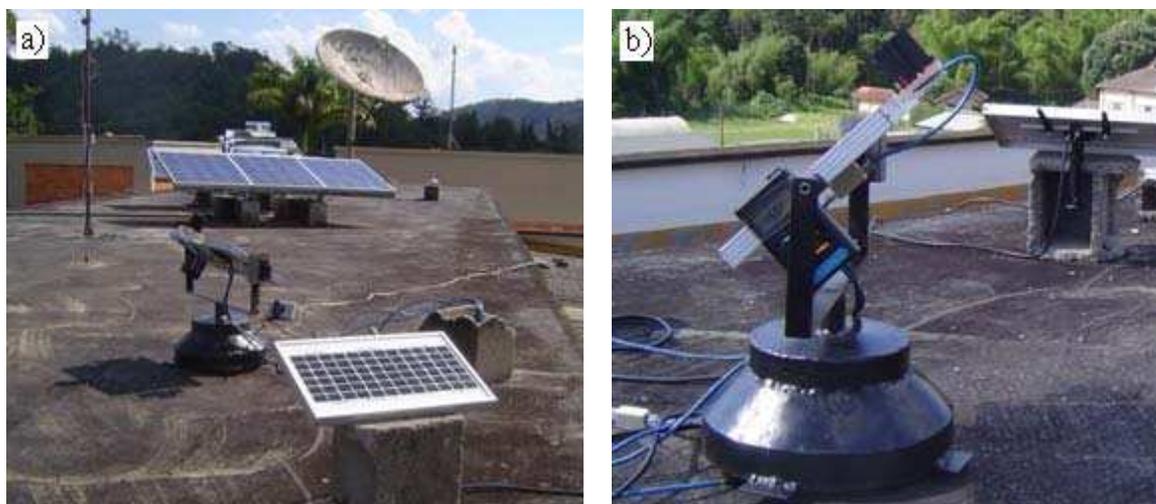
WEISS, W.; BERGMANN, I.; FANINGER, G. Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply, IEA Solar Heating & Cooling Programme, April 2007 p 50.



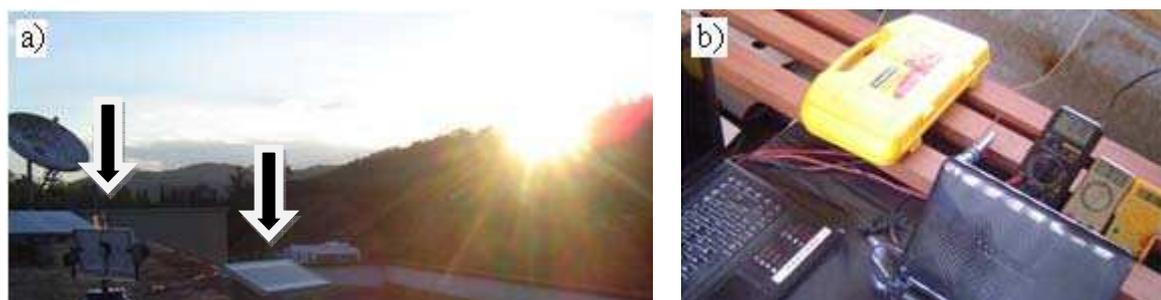
ANEXOS



A1 – Sistema de rastreamento: a) em fase de projeto, b) após construído.



A2 – Cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola: a) rastreador e placa fixa, b) rastreador solar com piranômetro acoplado.



A3 – Pôr do sol: a) em detalhe o sistema de rastreamento acompanhando completamente a trajetória aparente do sol e placa fixa com baixo rendimento, b) instrumentação para coleta de dados.