

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO E SEM
BATERIAS

CARLOS ANTONIO ALVES DE OLIVEIRA

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

MARÇO – 2007

CARLOS ANTONIO ALVES DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO E SEM
BATERIAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares - PROTEN do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fontes renováveis de energia.

ORIENTADOR: PROF. Dr. NAUM FRAIDENRAICH
CO-ORIENTAÇÃO: PROFa. Dra. OLGA DE CASTRO VILELA

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL

MARÇO – 2007

O48d Oliveira, Carlos Antonio Alves de.

Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. / Carlos Antonio Alves de Oliveira. - Recife: O Autor, 2007.

xvi, 64 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Energia Nuclear. 2. Rastreador Solar. 3. Energia Solar. 4. Geração Fotovoltaica. Título.

UFPE

621.042

CDD (22. ed.)

BCTG/2007-138

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO E SEM BATERIAS

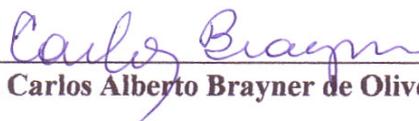
Carlos Antonio Alves de Oliveira

APROVADO EM: 09.03.2007

ORIENTADOR: Prof. Dr. Naum Fraidenraich

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE



Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas – DEESP/UFPE



Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PRÓTEN/DEN/UFPE

À minha mãe Maria de Fátima e minhas avós Alzira (em memória) e Maria Balbina.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Naum Fraidenraich e a Professora Olga Vilela por todas as contribuições, dedicação e estímulo às pesquisas.

Ao CNPq pelo incentivo concedido através de bolsa de pesquisa.

Ao Professores Carlos Brayner, Pedro Rosas e Chigueru Tiba pelas contribuições importantes.

À Professora Elielza Barbosa pelo apoio e colaboração.

À minha tia Lúcia, meus tios José Neuton e Rocha pelo apoio e estímulo primordiais a minha vida de estudante.

À Lívia por toda a ajuda, carinho, paciência e companhia durante a realização desta dissertação.

A todos familiares e amigos que contribuíram para realização deste trabalho.

Aos Amigos Aguiar, Rinaldo, Marcelo e Eric pela indispensável contribuição técnica para a realização desta dissertação.

Aos meus colegas e amigos de sala de aula pelo apoio: Gilmário, Tito, Adalberto, Flávio, Bráulio, Milton.

Ao Departamento de Assuntos Estudantis – UFPE e a Casa do Estudante Universitário – UFPE pela ajuda durante toda a graduação e início do Mestrado.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
SUMMARY	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	5
1.2 Objetivos	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Estrutura Mecânica	21
3.2 Sistema Eletrônico de Controle	25
3.2.1 Sensor de Alinhamento	28
3.2.2 Circuito de Retorno.....	32
3.2.3 Lógica de Controle.....	35
3.2.4 Circuito de Acionamento	37
3.2.5 Chaves fim de curso.....	38
3.3 Metodologia de Teste do Protótipo.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Irradiação Coletada nos Planos Fixo e com Rastreamento.....	48

4.2	Precisão do Acompanhamento do Sol	51
5	CUSTOS DO SISTEMA	55
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.1	Conclusões	58
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 – Rastreador passivo.	3
Figura 1.2 – (a) Rastreador ativo de um eixo e (b) Rastreador ativo de dois eixos com concentrador.	5
Figura 1.3 – Irradiância média diária observada por diferentes sistemas.	7
Figura 1.4 – Irradiação diária média mensal sobre diferentes sistemas ao longo do ano.	8
Figura 1.5 – Energia útil coletada por diferentes sistemas.	10
Figura 1.6 – Volume de água bombeado por sistemas fixo, com rastreador e com concentrador em função da energia solar coletada no plano fixo (BIONE et al, 2004).	11
Figura 2.1 – Sistema de rastreamento desenvolvido por Poulek; Libra (1998), (a) posição no início do dia e (b) posição durante rastreamento.	14
Figura 2.2 – Sistema de rastreamento desenvolvido por KARIMOV et al (2005).	16
Figura 2.3 – Sensores (D1-D4) responsáveis pela detecção da posição do Sol (ZOGBIT; LAPLAZE, 1983).	19
Figura 3.1 – Base fixa.	22
Figura 3.2 – Base fixa e plano móvel.	22
Figura 3.3 – Unidade motora.	23
Figura 3.4 – Sistema de tracionamento.	23
Figura 3.5 – Sistema de rastreamento desenvolvido, (a) vista Leste e (b) vista Oeste. .	25
Figura 3.6 – Sistema eletrônico de controle.	26
Figura 3.7 – Sistema fixado sob um módulo.	26

Figura 3.8 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico de controle.....	27
Figura 3.9 – Sensor de Alinhamento.....	28
Figura 3.10 – Estrutura de suporte dos LDR's.	29
Figura 3.11 – Estrutura usada no projeto para suporte dos LDR's (a) TRK e (b) REF..	31
Figura 3.12 – Circuito de retorno.....	34
Figura 3.13 – Circuito lógico de controle.....	36
Figura 3.14 – Circuito de acionamento.....	37
Figura 3.15 – Diagrama esquemático e funcional das chaves fim de curso.	39
Figura 3.16 – Chaves fim de curso.	40
Figura 3.17 – Chave fim de curso acionada.....	40
Figura 3.18 – Piranômetro LI-200SA.....	42
Figura 3.19 – Piranômetro PSP.....	42
Figura 3.20 – Datalogger CR10X.....	43
Figura 3.21 – Goniômetro.....	43
Figura 3.22 – Sistema de coordenadas (a) local e (b) do rastreador.....	44
Figura 4.1 – Irradiância medida para o dia 20 de Maio de 2006 (dia juliano 140).....	48
Figura 4.2 – Irradiância medida para o dia 22 de Maio de 2006 (dia juliano 142).....	49
Figura 4.3 – Irradiância medida para o dia 24 de Maio de 2006 (dia juliano 144).....	50
Figura 4.4 – Irradiância medida para o dia 01 de Junho de 2006 (dia juliano 152).....	51
Figura 4.5 – Posições do arranjo e ângulo horário ao longo do dia 01 de Junho.....	52
Figura 4.6 – Posições do arranjo e ângulo horário ao longo do dia 05 de Junho.....	53

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 5.1 – Custo dos materiais e serviços utilizados na estrutura mecânica do rastreador.	55
Tabela 5.2 – Custo dos componentes utilizados no sistema eletrônico de controle.	56

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

β	Ângulo de inclinação do eixo do plano do rastreador em relação à horizontal.
δ	Declinação Solar.
λ	Latitude local.
Ψ_{NS}	Ângulo de rastreio.
ω	Ângulo horário.
CC	Corrente contínua.
E	Hora padrão local, isto é, hora observada no relógio.
FAE	Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia – Recife – Brasil.
FV	Fotovoltaico.
h	Hora solar.
$I_{crítico}$	Nível mínimo de irradiância necessária para um determinado sistema iniciar o funcionamento.
kWh	Kilowatt-hora.
L_l	Longitude local.
L_p	Longitude padrão.
LDR	Resistor dependente de luz. Consagrado no Brasil o uso da sigla do inglês Light Dependent Resistor.
LED	Diodo emissor de luz. Consagrado o uso no Brasil da sigla do inglês Light Emitting Diode.

MOSFET	Transistor de efeito de campo. Consagrado o uso no Brasil da sigla do inglês Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
N	Dia juliano, que corresponde ao dia do ano contado de forma corrida.
rpm	Rotações por minuto.
SCR	Retificador controlado a silício. Consagrado no Brasil o uso da sigla do inglês Silicon Controlled Rectifier.

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO E SEM BATERIAS

Autor: Carlos Antonio Alves de Oliveira.

Orientador: Prof. Dr. NAUM FRAIDENRAICH.
Co-orientadora: Prof. Dra. OLGA DE CASTRO VILELA.

RESUMO

Nos últimos cinquenta anos, o uso da energia solar no mundo tem crescido consideravelmente em suas principais modalidades de aproveitamento: térmica e fotovoltaica. Apesar da significativa evolução da tecnologia fotovoltaica ao longo das últimas décadas, o custo da energia produzida por esses sistemas continua sendo elevado quando comparado à energia produzida por sistemas convencionais. Diversos meios que tendem a reduzir esses custos têm sido experimentados, dentre os quais se encontra o uso de dispositivos de acompanhamento do movimento do Sol (rastreadores). Neste trabalho é apresentado um modelo de rastreador solar com seguimento em uma direção, desenvolvido e construído nos laboratórios do Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia. Este rastreador utiliza em seu circuito de controle componentes eletrônicos simples e de baixo custo. Uma estrutura mecânica simples foi também desenvolvida. Estas características, juntamente com a não utilização de baterias, resultaram em um sistema que não possui o alto custo relacionado à aquisição e manutenção de sistemas de rastreamento comercialmente disponíveis. O circuito eletrônico desenvolvido utiliza a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos do

sistema para realizar o acompanhamento ao longo do dia. A ausência de geração de energia durante a noite foi utilizada para garantir a reinicialização do circuito eletrônico de controle, que ativa o retorno do arranjo à posição inicial ao ser alimentado pelos módulos do sistema na manhã seguinte. Isto eliminou a necessidade de um sensor específico para acionar o retorno. Ajustes realizados no sistema de controle com o rastreador em funcionamento tornaram o rastreador menos sensível a radiação difusa, diminuindo a ocorrência de erros no seguimento do Sol em dias nublados (problema típico em sistemas de rastreamento). Testes realizados com o sistema acompanhando o Sol em seu movimento Leste-Oeste mostraram resultados que validam o sistema. O rastreador se comportou de forma confiável mesmo em dias nublados e com baixo nível de radiação, apresentando boa precisão no seguimento do movimento do Sol para altos níveis de irradiância, com erros máximos de 1 grau. Foram verificados ganhos na energia diária coletada variando entre 15%, para um dia nublado, e 31% para um dia de céu limpo. O rastreador montado apresentou um custo equivalente a cerca de 34% do custo de um rastreador comercialmente disponível com capacidades semelhantes.

Palavras-Chave: rastreador solar, energia solar, geração fotovoltaica.

DEVELOPMENT OF A LOW COST SOLAR TRACKER PROTOTYPE WITHOUT BATTERIES

Author: Carlos Antonio Alves de Oliveira.

Adviser: Prof. Dr. NAUM FRAIDENRAICH.
Co-adviser: Prof. Dra. OLGA DE CASTRO VILELA.

SUMMARY

In the last fifty years, the use of solar energy in the world has been growing considerably in its principal modalities: thermal and photovoltaic. Although there has been significant evolution of the photovoltaic technology along the last decades, the cost of the energy produced by those systems is still expensive when compared to the energy produced by conventional systems. Several technologies tending to reduce those costs have been proposed and tested. One of them is the use of devices that follow the movement of the Sun (Solar Trackers). In this work, a prototype of solar tracker that follows the Sun in its movement along the East-West direction is presented and tested. This tracker uses only simple and low cost electronic components on its control circuit. A mechanical support was also developed to allow the suntracking. The developed system eliminates the high costs related to acquisition and maintenance of imported and industrialized systems. It uses the energy produced by its own photovoltaic collectors to follow the Sun along the day, and the absence of generation of energy during the night to activate the return of the arrangement to its initial position in the morning, which eliminates the need of a sensor to command the return of the system. Some adjustments

in the control system turned the tracker less sensitive to diffuse radiation, reducing the occurrence of mistakes when it follows the Sun in cloudy days (typical problem of solar trackers). Tests showed satisfactory results of the system operation. The tracker worked reliably in cloudy days and with low radiation level and it presented good accuracy to follow of the Sun's movement on sunny days, with maximum error of 1 degree. The gain verified in the collected daily energy varied between 15%, for a cloudy day, and 31% for a day of clean sky. The cost of the project was about 34% of the cost of an industrialized system with similar characteristics.

Key words: solar tracker, sun tracking, solar energy, photovoltaic.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos cinquenta anos, a partir do segundo pós-guerra, o uso da energia solar no mundo tem crescido consideravelmente em suas principais modalidades de aproveitamento: térmica e fotovoltaica (FV). Como resultado do desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, têm sido propostos, durante os últimos anos, sistemas para aplicações rurais isoladas (sistemas autônomos) e sistemas para uso urbano, interligado à rede elétrica (sistemas interligados e/ou integrados) (KALOGIROU, 1996). Para o caso dos sistemas autônomos, aplicações importantes e viáveis são a eletrificação rural, bombeamento de água, sistemas de telecomunicações, sistemas de aquisição de dados, e atualmente, processos de dessalinização de água por osmose reversa (LIMA, 2006).

Apesar da significativa evolução da tecnologia fotovoltaica ao longo das últimas décadas, o custo da energia (kWh) produzida por esses sistemas continua sendo elevado. Valores de 4 a 5 vezes o custo da energia convencional são freqüentes para instalações fotovoltaicas.

Diversos meios que tendem a reduzir esses custos têm sido experimentados. Essencialmente, utilizam-se dispositivos para acompanhamento do movimento do Sol (rastreadores) e concentradores de baixa relação de concentração, sendo no segundo caso indispensável o uso em conjunto com um rastreador solar.

Sistemas fotovoltaicos com concentradores de baixa relação de concentração e seguimento solar têm sido utilizados tradicionalmente em centrais fotovoltaicas de grande porte; Carrisa Plains (Califórnia) (BERMAN; MITCHELL, 1989), Toledo (Espanha) (MARTINEZ, 2003) e mais recentemente Sevilla (VALERA et al, 2004)

(ABELLA, 2004). Entretanto, foi mostrado que o uso de rastreadores e/ou concentradores da radiação solar em certos sistemas de pequeno porte pode apresentar vantagens substanciais, como por exemplo, bombeamento fotovoltaico e abastecimento de água (VILELA et al, 2003), onde foi verificado que sua utilização se traduz em uma redução importante do custo da água. Isto torna os dispositivos de rastreamento de grande interesse, seja para sistemas de grande ou pequeno porte.

Um módulo fotovoltaico gera energia elétrica a partir da componente de radiação solar que incide perpendicular ao seu plano, isto implica em uma maior geração de energia quando o módulo fotovoltaico está faceando diretamente o Sol. A utilização de um rastreador solar aumenta a produção de energia mantendo os módulos fotovoltaicos perpendiculares aos raios solares.

Um rastreador solar deve ser capaz de seguir o Sol com uma boa precisão e confiabilidade, garantindo que a radiação solar direta¹ incida perpendicularmente ao plano dos módulos fotovoltaicos ao longo do dia e que o sistema funcione adequadamente por longos períodos de tempo. Deve ainda realizar o retorno do arranjo fotovoltaico à sua posição inicial (inclinação máxima para o Leste) e garantir uma incidência perpendicular da radiação solar com os coletores fotovoltaicos ao amanhecer. A precisão exigida do sistema de rastreamento no acompanhamento do Sol depende do tipo de aplicação onde o sistema é empregado. O uso em instrumentação normalmente exige alta precisão no rastreamento. Para utilização de concentradores, também é imprescindível o emprego de alguma forma de rastreamento com boa precisão para

¹ Radiação solar interceptada por uma superfície que não sofre mudança de direção ou espalhamento na atmosfera.

assegurar um adequado desempenho (VILELA; FRAIDENRAICH, 2001). Se utilizado isoladamente com módulos FV, a precisão exigida passa a ser menor.

Há duas grandes categorias de rastreadores solares: o passivo e o ativo. O rastreador passivo, que pode ser visto na Figura 1.1, faz uso do efeito da transferência de massa (peso) de um lado do rastreador para o outro para acompanhar o Sol. Dois reservatórios com estruturas de sombreamento adequadas são montados nos lados Leste e Oeste do rastreador. Estes reservatórios são conectados por um tubo e preenchidos com um fluido, normalmente o Freon, que vaporiza a uma temperatura relativamente baixa. O líquido percorre este circuito fechado, movendo-se do reservatório mais aquecido para o outro devido a sua vaporização. A transferência de peso de um lado do rastreador para o outro provoca sua rotação, que resulta no acompanhamento do Sol.

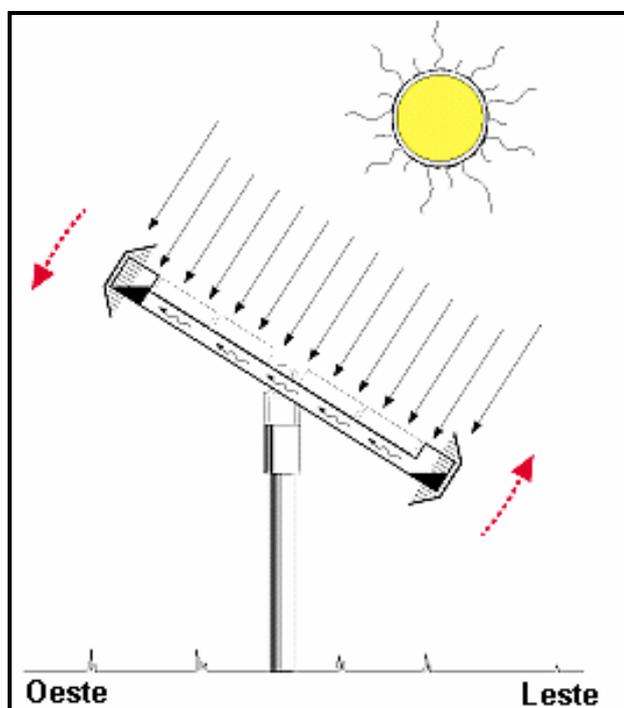


Figura 1.1 – Rastreador passivo.

Como o sistema utiliza apenas o efeito do aquecimento solar, não é necessária qualquer alimentação adicional de energia. É um rastreador geralmente simples e confiável, porém bastante dependente de fatores ambientais como a temperatura. Seu funcionamento limita-se a seguir o Sol em seu movimento Leste-Oeste ao longo do dia, sem responder aos deslocamentos anuais na direção Norte-Sul. Também possui uma resposta relativamente lenta, sendo que sua precisão não é adequada para o uso com concentradores (POULEK; LIBRA, 1998).

O rastreador do tipo ativo envolve o uso de um ou mais motores elétricos para movimentar o arranjo fotovoltaico. Cada motor é controlado por meio de um circuito eletrônico que recebe dados da posição do Sol por meio de sensores. Uma variação do rastreador ativo é o uso de um controle microprocessado (AL-NAIMA; YAGHORIAN, 1991). Nestes rastreadores, a posição exata do Sol é calculada através de software. Por meio de sensores que informam a posição na qual se encontra o arranjo fotovoltaico, o microprocessador controla a movimentação do arranjo, mantendo-o alinhado com o Sol. Rastreadores ativos não sofrem influência das condições meteorológicas e podem oferecer alta precisão. Contudo, é um sistema de maior complexidade, que envolve o uso de componentes eletrônicos, motores elétricos e, frequentemente, baterias, apresentando uma confiabilidade bastante inferior aos rastreadores passivos.

Os rastreadores solares ativos podem realizar o acompanhamento do Sol em um ou em dois eixos. De forma simples, um rastreador de um eixo possui um único eixo na direção Norte-Sul, em torno do qual o arranjo fotovoltaico gira para se alinhar com o Sol ao longo do dia. No caso de um rastreador de dois eixos existe ainda um segundo eixo na direção Leste-Oeste que permite que o arranjo ajuste sua inclinação para se

adequar às diferentes inclinações do Sol ao longo das estações do ano. Na Figura 1.2(a) é mostrado um exemplo de rastreador ativo com acompanhamento em um eixo. Como comentado, neste sistema está presente apenas o eixo na direção Norte-Sul, e o rastreador segue o Sol apenas em seu movimento diário na direção Leste-Oeste. Um exemplo de rastreador de dois eixos é mostrado na Figura 1.2(b). Devido à presença do segundo eixo, este sistema além de seguir o Sol ao longo do dia, se alinha às suas diferentes posições ao longo da direção Norte-Sul.



(a)



(b)

Figura 1.2 – (a) Rastreador ativo de um eixo e (b) Rastreador ativo de dois eixos com concentrador.

1.1 Justificativa

Atualmente se encontram disponíveis diversos rastreadores solares no mercado internacional. Contudo, existem algumas dificuldades em sua aquisição que se tornam

entraves para o seu uso em larga escala. Uma delas é devido aos rastreadores disponíveis serem importados, o que eleva o custo para sua aquisição. Outra dificuldade importante está relacionada à manutenção destes equipamentos, uma vez que normalmente são utilizados em seus circuitos componentes eletrônicos pouco comuns no mercado local, sendo necessário importá-los quando se faz necessária sua substituição. Isto torna a manutenção do equipamento onerosa e, na maioria das vezes, demorada.

O desenvolvimento de um rastreador solar próprio, com tecnologia simples, eficiente e com componentes de fácil disponibilidade no mercado local, elimina todas as dificuldades acima citadas.

A grande maioria dos sistemas de rastreamento ativos necessita de uma fonte ininterrupta de energia para alimentar seu circuito eletrônico e motores. É comum o uso de baterias para armazenar e prover essa energia. Baterias aumentam os custos e diminuem a confiabilidade do sistema, pois possuem vida útil muito inferior à de um módulo fotovoltaico, além de adicionar uma característica poluente a um sistema tipicamente conhecido pelo seu baixo impacto ambiental. A não utilização de baterias na alimentação do rastreador elimina os problemas citados, proporcionando uma redução dos custos e da manutenção do sistema. Em um sistema desse tipo, a energia usada no acompanhamento ao longo do dia é provida pelos próprios módulos do sistema.

Embora existam dificuldades na aquisição e utilização de rastreadores, sobretudo os ativos, o emprego destes sistemas proporciona um aumento da irradiância sobre os módulos fotovoltaicos, o que se reflete em um ganho na energia gerada pelos mesmos. Os gráficos apresentados na Figura 1.3 e Figura 1.4 mostram comparações entre os

desempenhos de um sistema fixo, um sistema com rastreamento em um eixo e um sistema com rastreamento em dois eixos. Estes dados foram obtidos através de simulação para a cidade de Recife utilizando o software Eletrificação Rural[©] (OLIVEIRA et al, 2002). Os sistemas fixo e com um eixo foram posicionados de forma a favorecer a coleção de energia nos meses de menor incidência da radiação solar. Na Figura 1.3 são comparados os valores de irradiância solar² correspondentes a um dia 1º de Janeiro.

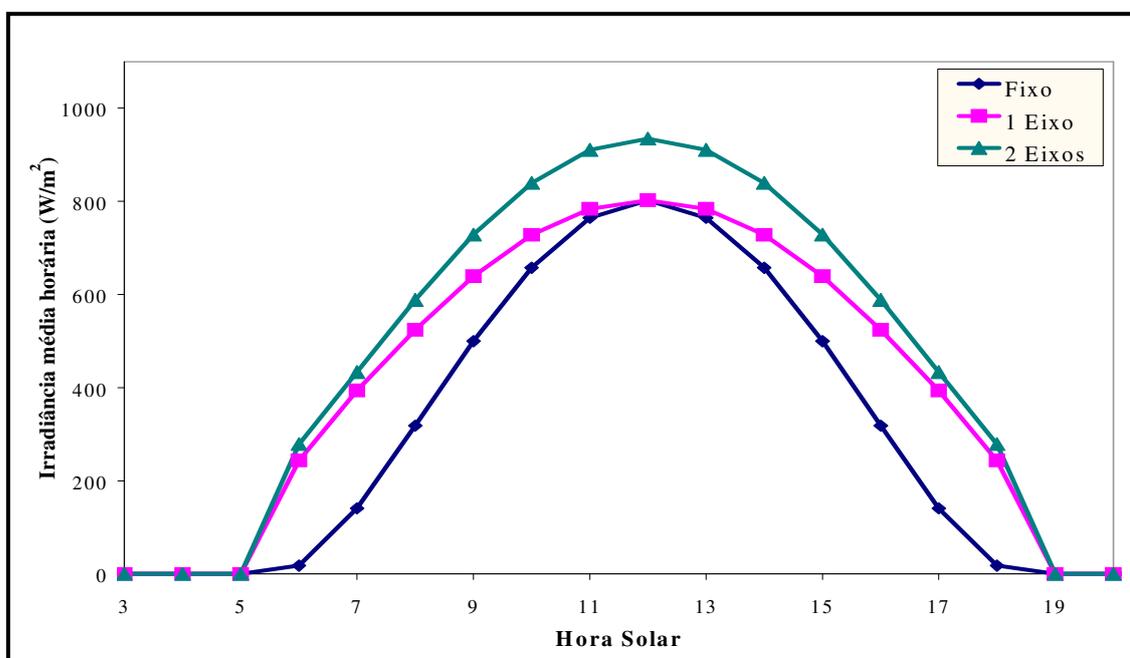


Figura 1.3 – Irradiância média diária observada por diferentes sistemas.

A Figura 1.3 indica o ganho obtido com a utilização de rastreadores. Para este dia apresentado, os ganhos oferecidos pelo uso dos rastreadores de um e dois eixos na irradiação coletada em relação aos sistemas fixos foram em torno de 32% e 51%,

² Taxa com que a energia solar radiante incide sobre uma superfície unitária (W/m²).

respectivamente. É possível observar que o rastreador de um eixo não oferece ganho na irradiância ao meio dia solar, pois neste instante o mesmo se encontra na mesma posição que a do sistema fixo. Também pode ser observado que o ganho na irradiação diária apresentado pelo rastreador de dois eixos foi bastante superior aos demais sistemas. Este ganho superior é devido ao posicionamento dado aos sistemas fixo e de um eixo favorecer a coleção de energia no inverno, o que, inevitavelmente desfavorece a coleção no dia simulado de pleno verão.

Na Figura 1.4 são apresentadas comparações entre os valores de irradiação solar³ diária média mensal simulada usando-se os três sistemas.

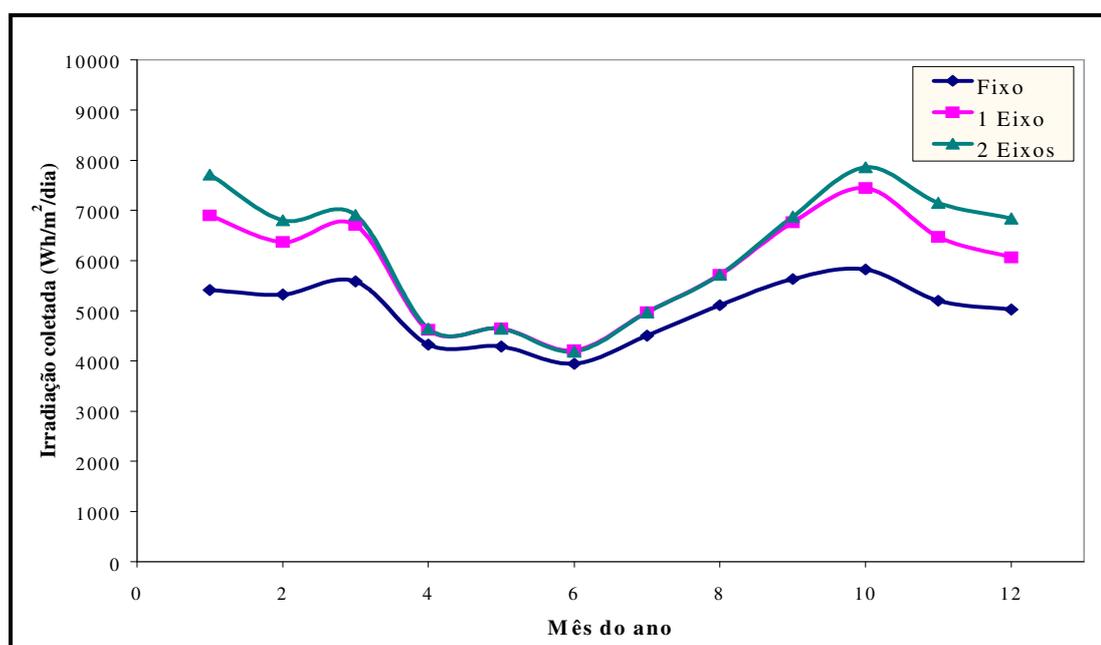


Figura 1.4 – Irradiação diária média mensal sobre diferentes sistemas ao longo do ano.

³ Energia solar incidente sobre uma área (Wh/m²).

Estes valores de irradiação correspondem a dados simulados para um ano inteiro. Os ganhos observados na irradiação diária média mensal mudam de acordo com o mês considerado, variando entre 6% e 27% para rastreadores de um eixo, e 6% e 42% para o rastreamento em dois eixos. Os ganhos anuais oferecidos pelos sistemas simulados foram de 20% para o rastreamento em um eixo e 27% para rastreamento em dois eixos.

Se forem comparados os desempenhos dos dois sistemas com rastreamento desta simulação, tem-se que o sistema com rastreamento um eixo foi capaz de coletar 94% da energia coletada pelo sistema de dois eixos. De fato, estudos teóricos mostram que, na média anual, um sistema de rastreamento solar em um eixo obtém 96% da energia coletada por um rastreador com dois eixos (RABL, 1985). Desta forma, a menos que algum dispositivo (concentradores, instrumentação, etc.) exija a utilização de um rastreador de dois eixos, não foi julgado compensatório seu uso, tendo em vista sua maior complexidade e custo (HESSION; BONWICK, 1984).

Uma das principais justificativas para o uso de sistemas de rastreamento é o aumento da energia útil coletada, que corresponde à energia produzida por níveis de irradiância acima de um nível crítico ($I_{\text{crítico}}$) exigido para o funcionamento de um determinado sistema. Para sistemas que possuem um $I_{\text{crítico}}$ elevado, o uso de rastreadores proporciona um ganho na produção superior ao ganho de energia coletada. Este ganho não linear na produção torna seu emprego ainda mais vantajoso.

Na Figura 1.5 pode ser observado o efeito da existência de um nível mínimo de irradiância exigido para o funcionamento de um sistema qualquer. Irradiâncias abaixo de $I_{\text{crítico}}$ não produzem energia útil.

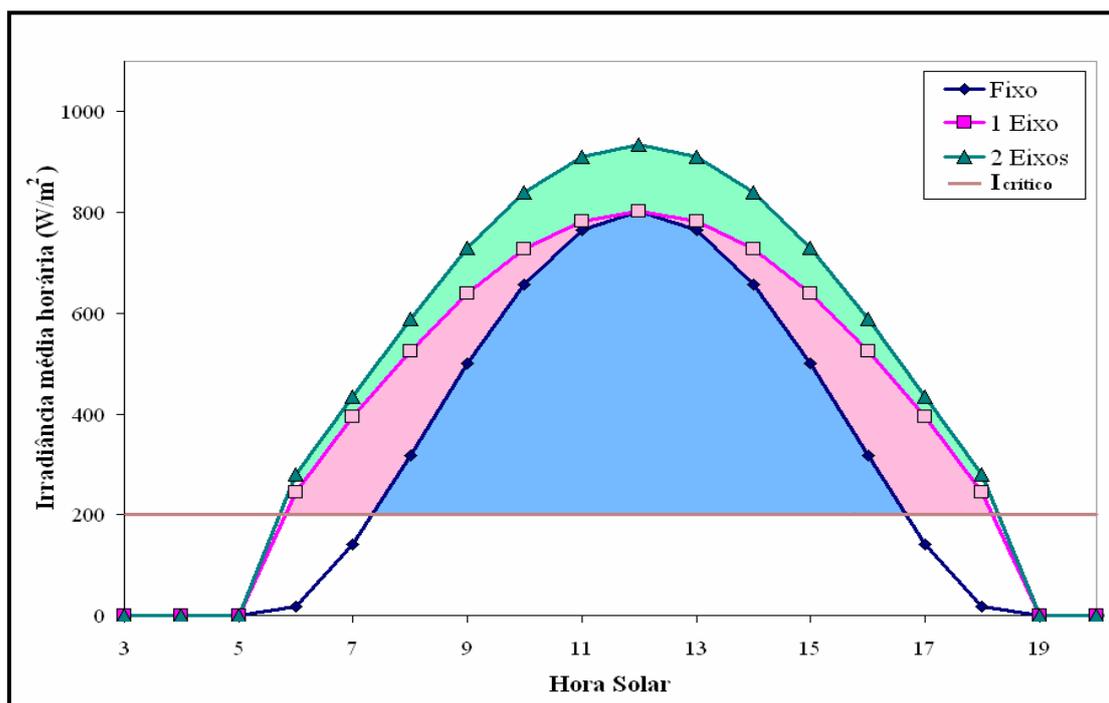


Figura 1.5 – Energia útil coletada por diferentes sistemas.

Pode ser observado que o sistema de rastreamento em um eixo produz um acréscimo na energia útil em relação a um sistema fixo correspondente à área rosa da figura, enquanto o sistema com rastreamento em dois eixos proporciona, em relação ao sistema com rastreamento em um eixo, um aumento equivalente à área verde. Também, o uso de rastreadores permite ao conjunto gerador fotovoltaico–carga funcionar por um período de tempo maior ao longo do dia, iniciando a produção mais cedo e finalizando mais tarde.

Como exemplo, o uso de um rastreador com seguimento de um eixo em um determinado sistema de bombeamento de água proporciona um ganho da irradiação coletada de cerca de 20%, porém um ganho em volume de água bombeada em torno de 39%. Este ganho na produção depende das características do sistema de bombeamento usado (VILELA et al, 2003).

Diversos trabalhos estudaram o uso da energia solar em sistemas de bombeamento, avaliando a maneira de se obter a melhor relação custo-benefício, dentre as opções existentes (BIONE et al, 2004) (VILELA et al, 2003) (VILELA; FRAIDENRAICH, 2001). O gráfico da Figura 1.6 mostra as curvas da relação de volume de água bombeado, para diferentes valores de irradiação solar diária ($\text{Wh/m}^2\text{dia}$) coletada no plano fixo. Nele podem ser comparados os resultados obtidos com o uso dos sistemas com painel fotovoltaico fixo, painel com rastreador e painel com rastreador e concentrador tipo V (V-trough) para a cidade de Recife (BIONE et al, 2004).

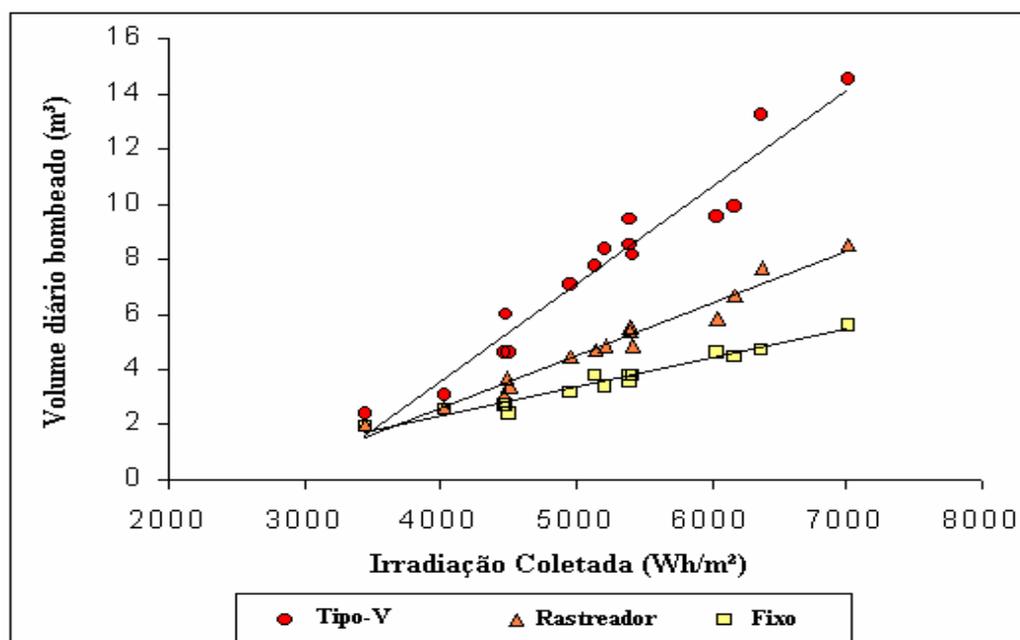


Figura 1.6 – Volume de água bombeado por sistemas fixo, com rastreador e com concentrador em função da energia solar coletada no plano fixo (BIONE et al, 2004).

O gráfico da Figura 1.6 deixa clara a vantagem obtida com a utilização de um rastreador, sobretudo quando se tem associado a este um concentrador. O custo de um sistema com rastreador é, sem dúvida, superior a um com painel fixo. Porém, foi

verificado que a relação custo-benefício é bastante favorável ao uso de rastreador (BIONE et al, 2004).

1.2 Objetivos

Desenvolver um protótipo de um sistema de rastreamento solar completo, de baixo custo e sem baterias. Para isto, foi necessário desenvolver suas partes mecânicas e eletroeletrônicas. O protótipo deve possuir as seguintes características:

- Rastrear em torno de um eixo;
- Utilizar componentes eletrônicos simples, de baixo custo e de fácil obtenção no mercado local;
- Seguir o movimento relativo do Sol ao longo do dia através de um sensor de alinhamento, enquanto um segundo circuito eletrônico controla o retorno do painel para a posição inicial (o nascente);
- Utilizar caixas de redução e/ ou outras técnicas de acoplamento mecânico para aumento do torque fornecido pelo motor;
- Apresentar uma precisão boa no acompanhamento do Sol;
- A alimentação de energia dos circuitos eletrônicos e do motor deve ser provida pelos módulos fotovoltaicos do rastreador, dispensando o uso de baterias.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Existem numerosos trabalhos relacionados ao desenvolvimento e construção de rastreadores solares, desde sistemas passivos simples até sistemas ativos com microprocessadores de grande complexidade. As aplicações para estes rastreadores vão desde sistemas de aquecimento, passando por sistemas com concentração, até mecanismos para uso em instrumentação (radiômetros), que exigem uma alta precisão no acompanhamento do Sol.

Excetuando os sistemas passivos e aqueles que, como serão vistos, não usam circuitos eletrônicos para o controle dos movimentos, todos os demais fazem uso de baterias, já que estas fornecem uma alimentação ininterrupta ao circuito eletrônico e ao(s) próprio(s) motor(es) do rastreador.

Nesta revisão de literatura, alguns trabalhos importantes são brevemente descritos seguindo uma ordem crescente de complexidade, objetivando uma compreensão melhor dos diferentes dispositivos desenvolvidos.

POULEK; LIBRA (1998) descreveram um tipo simples de um rastreador solar que combina a eficiência dos rastreadores ativos e a simplicidade dos rastreadores passivos. Com um custo bastante reduzido, seu protótipo baseia-se em um arranjo de células solares conectadas diretamente a um motor CC reversível, eliminando assim o sistema de controle eletrônico. A Figura 2.1 mostra o sistema desenvolvido.

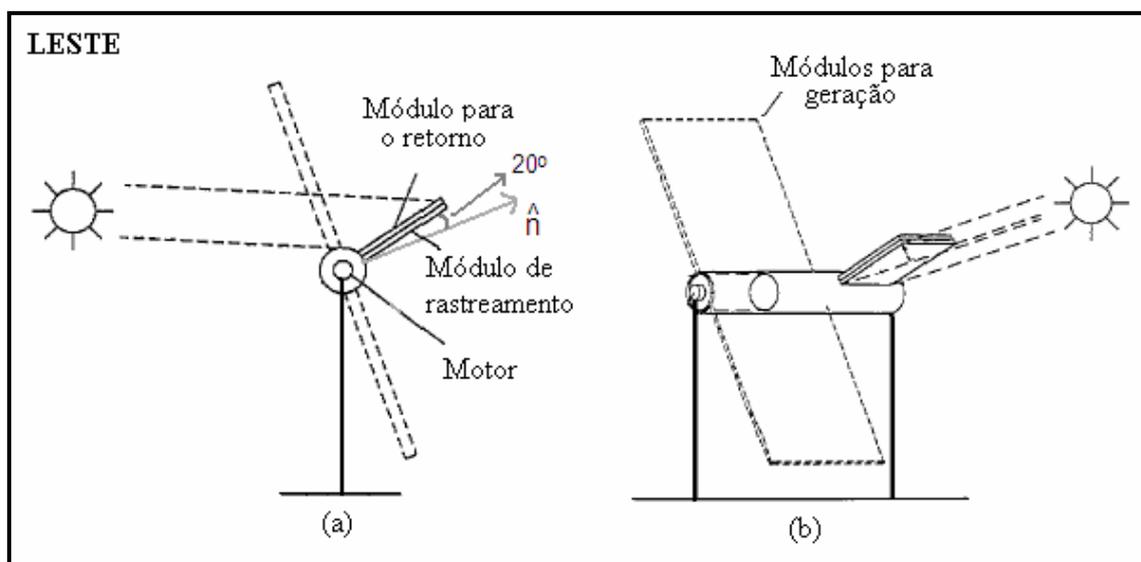


Figura 2.1 – Sistema de rastreamento desenvolvido por Poulek; Libra (1998), (a) posição no início do dia e (b) posição durante rastreamento.

O rastreador desenvolvido apresenta dois módulos fixados sobre o seu eixo de rotação e dispostos com as faces posteriores em contato. Estes módulos são posicionados com inclinação de aproximadamente 20 graus na direção Leste em relação ao plano perpendicular aos coletores de energia. Com o movimento do Sol no seu sentido Leste-Oeste, o ângulo de incidência da radiação solar com módulo de face voltada para Oeste é diminuído, aumentando a potência gerada por este até um valor suficiente para mover os coletores solares.

Com o movimento de acompanhamento, o ângulo de incidência aumenta até que a potência fornecida seja insuficiente para mover os coletores solares. O segundo módulo usado, com face voltada para Leste, é responsável pelo retorno do sistema. Este retorno ocorre de forma rápida, mesmo quando os rastreadores são utilizados em temperaturas extremamente baixas (abaixo de -40°C). Componentes de custo elevado e de menor confiabilidade, como baterias e circuitos eletrônicos, foram completamente

eliminados. O rastreador desenvolvido apresenta um ângulo de total de rastreio⁴ de aproximadamente 120 graus, e foi projetado para seguir o Sol com uma precisão aceitável, uma vez que os coletores planos com desvios angulares da ordem de ± 10 graus experimentam uma redução na energia coletada de apenas cerca de 1,5%. O sistema é barato (pode chegar a menos de US\$75,00/m²), trabalha bem em temperaturas extremamente baixas (menores que -40° C) e é capaz de ativar o retorno do arranjo a partir de qualquer posição.

Semelhante ao trabalho de POULEK, KARIMOV et al (2005) projetou um sistema de rastreamento que também dispensa o uso de circuitos eletrônicos para a determinação da posição do Sol e controle do funcionamento do motor. Em seu projeto o motor é também alimentado e acionado diretamente por módulos FV, sendo, neste caso, os próprios módulos do sistema. O dispositivo desenvolvido, mostrado na Figura 2.2, utiliza quatro módulos dispostos com uma angulação (α) entre si que dá origem a uma diferença entre as tensões geradas pelos mesmos. Esta diferença de potencial, que aparece quando o plano do arranjo não está alinhado com o Sol, aciona diretamente o motor que fará o sistema se alinhar. O rastreador foi montado sobre um suporte piramidal com um ângulo de inclinação entre os módulos e o plano horizontal ajustável ($34^{\circ} \pm 11^{\circ}$) e apresentando um ângulo de total de rastreio de 120 graus. A precisão no rastreamento foi de cerca de 10 graus e o sistema como um todo mostrou oferecer uma baixa resistência ao vento.

⁴ Ângulo descrito pelo plano do rastreador ao longo do dia, medido desde o arranjo em sua posição mais ao Leste até sua posição mais a Oeste.

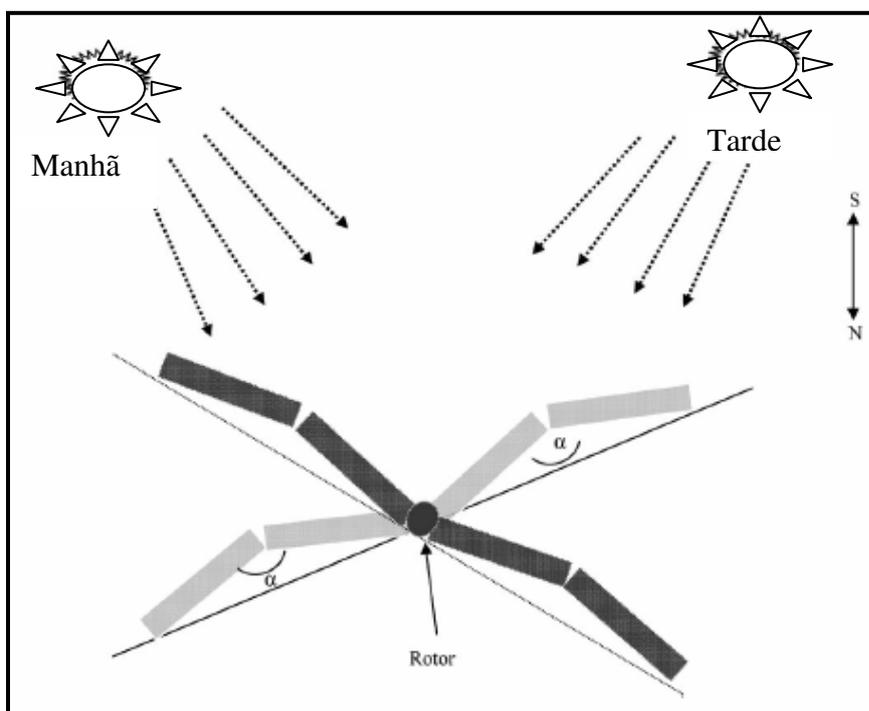


Figura 2.2 – Sistema de rastreamento desenvolvido por KARIMOV et al (2005).

KALOGIROU (1996) desenvolveu um sistema de rastreamento solar de um eixo que consiste de um pequeno motor CC que rotaciona a estrutura através de uma caixa de redução de velocidade. Um sistema eletrônico é usado para detectar a posição do Sol e operar o motor. O sistema emprega três sensores: A, B e C, todos baseados em LDR's⁵ (Light Dependent Resistor). O sensor "A" atua como um sensor de "foco", e recebe a radiação direta do Sol quando o coletor está focalizado, ou seja, alinhado com o Sol. Com o movimento do Sol, o sensor vai sendo sombreado até um certo nível, circunstância em que o motor é ativado e o sistema volta a se alinhar com o Sol. O sensor "B", denominado sensor de nuvem, detecta e assume a situação de nublado

⁵ Resistores dependentes de luz. Componentes eletrônicos que têm sua resistividade alterada pela intensidade e comprimento de onda da luz incidente. Mantida a sigla do Inglês Light Dependent Resistor por ser consagrada no Português.

quando a irradiância que nele incide é inferior a um certo nível, predeterminado através de um potenciômetro. Quando essa situação é assumida, um temporizador é automaticamente ativado. Este temporizador aciona o motor responsável pelo alinhamento a cada 2 minutos e por um período de 7 segundos, fazendo o coletor seguir, aproximadamente, o caminho do Sol. Reaparecendo o Sol, o temporizador é desativado e o controle volta a ser assumido pelo sensor “A”. O sensor “C” é o sensor “luz do dia” e é responsável pelo acionamento do retorno do arranjo a sua posição inicial. Quando o sistema de controle percebe a condição dos três sensores recebendo irradiância acima de seus limiares, ele entende que é dia, sem presença de nuvem e que o coletor está alinhado. O sistema mecânico utiliza um pequeno motor CC e uma caixa de redução (caixa de engrenagens). O motor opera em 12V e gira a 6 rotações por minuto (rpm). A caixa de redução usada tem uma razão de 45:1, o que reduz a velocidade de saída para 0,13 rpm. A velocidade de saída é ainda reduzida pelo sistema mecânico que movimenta a estrutura com os módulos, apresentando uma velocidade final de 0,011 rpm. O sistema leva 38 minutos para realizar todo o percurso se acionado ininterruptamente. O controle foi implementado utilizando componentes eletrônicos analógicos básicos (transistores, resistores, LED's, relés) e componentes digitais (portas lógicas, timer). A precisão apresentada pelo sistema no acompanhamento do Sol depende da intensidade da radiação solar. Para níveis de irradiância da ordem de 100 W/m² a precisão foi de 0,2 graus, enquanto para níveis da ordem de 600 W/m² esta precisão aumenta para 0,05 graus. O custo do mecanismo completo incluindo o motor CC foi de US\$250,00. O sistema eletrônico sozinho, incluindo os três sensores, teve um custo de US\$160,00.

Um outro sistema eletrônico foi desenvolvido por LYNCH; SALAMEH (1990) para o controle de um rastreador solar de dois eixos utilizando dois sensores óptico-eletrônicos. O primeiro sensor é formado por quatro células solares montadas em uma estrutura piramidal fixada no plano do arranjo. O segundo sensor, fixado fora da estrutura do rastreador, tem como função informar a presença ou não de radiação direta e a posição absoluta do Sol, resolvendo em parte os problemas de partida e rastreamento com radiação difusa⁶. Tal sensor oferece uma moderada diferenciação entre radiação direta e difusa. O sistema faz o acionamento do motor através de transistores MOSFET's. O rastreador também possui um circuito de desligamento, que atua quando nenhuma radiação direta está presente. Um protótipo testado apresentou uma precisão relativamente alta. Em um dia claro, a precisão medida foi de aproximadamente 0,1 graus. Para dias muito nublados ou enevoados, ocorreram problemas no rastreamento, devido à radiação difusa. O preço da montagem do sistema foi baixo. O controlador, por exemplo, teve um custo em torno de US\$15,00 (não incluídos motores, sensores e interconexões). A unidade de controle é relativamente simples e confiável e pode ser usada em coletores planos e sistemas com moderado índice de concentração.

Um sistema de rastreamento de dois eixos foi desenvolvido por ZOGBIT; LAPLAZE (1983). Tal sistema utiliza em sua configuração quatro sensores óptico-elétricos (D_1 - D_4) que são responsáveis pela detecção da posição do Sol. Estes sensores são colocados em um pistão cilíndrico com quatro ranhuras que recebem os fototransistores, mostrado na Figura 2.3, e que pode se mover no interior de um cilindro. Na posição alta, ou seja, com o pistão fora do cilindro, o sistema é capaz de

⁶ Radiação solar que sofre processo de espalhamento na atmosfera, incidindo nos módulos e sensores em todas as direções.

encontrar o Sol rapidamente. Na posição baixa, a localização pode ser feita com maior precisão, servindo como um ajuste fino. A saída de cada par de detectores D_1 - D_2 e D_3 - D_4 alimenta um amplificador diferencial. O sinal erro produzido quando o Sol não está focalizado sai do amplificador diferencial e é suficientemente amplificado para acionar, através de transistores, o motor que alinhará o sistema ao Sol. É usado, ainda neste circuito de controle, um LDR que mantém a sensibilidade dos amplificadores diferenciais quase constante para altos e baixos níveis de irradiância. O movimento de subida e descida do pistão é controlado por outro circuito eletrônico. Este circuito utiliza outro LDR para controlar um relé que acionará o motor responsável pelo movimento do pistão. No caso do retorno do sistema à sua posição inicial (Leste), é utilizado um outro circuito eletrônico semelhante ao anterior. A precisão verificada para o sistema foi de cerca de 0,07 graus.

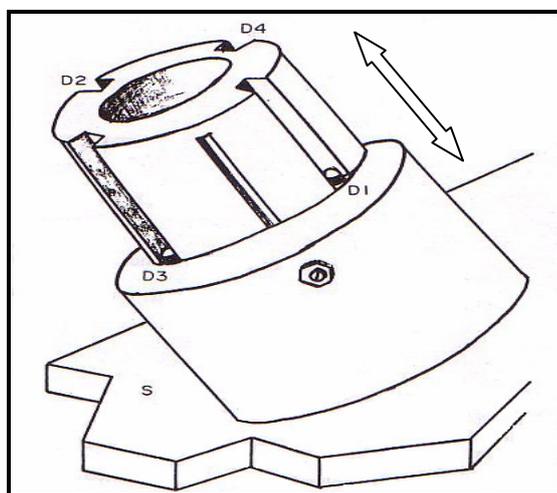


Figura 2.3 – Sensores (D1-D4) responsáveis pela detecção da posição do Sol (ZOGBIT; LAPLAZE, 1983).

MONTEIRO et al (2005) desenvolveu um sistema de controle para um rastreador solar de um eixo, utilizando componentes simples e disponíveis no mercado local. O sistema é composto por dois sensores: Um deles é responsável pelo alinhamento do arranjo fotovoltaico ao longo do dia e o outro é usado para informar quando é dia ou noite, ativando ao anoitecer o retorno do sistema à posição inicial. Um circuito eletrônico simples recebe os sinais dos sensores e comanda o acionamento do motor que faz a estrutura girar para se alinhar à posição do Sol ou retornar à posição inicial no fim do dia. O sistema de controle e o motor são alimentados através de baterias, que são mantidas carregadas através do arranjo fotovoltaico. Testes realizados com o sistema de controle montado em uma estrutura mecânica já existente com motor CC de 24 volts e caixa de redução adequada mostraram desvios diários médios inferiores a 8 graus, e um ganho na irradiação diária em relação a um coletor fixo em torno de 28% para o dia 11 de dezembro na cidade de Recife.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como o objetivo principal do trabalho foi desenvolver um protótipo de um rastreador completo, foi necessário desenvolver as partes mecânica e eletrônica do sistema.

3.1 Estrutura Mecânica

Inicialmente, foi montada uma estrutura mecânica básica para um sistema de rastreamento solar em um eixo, onde foram sempre priorizadas as soluções simples e que oferecem confiabilidade e baixo custo.

A estrutura montada consiste basicamente de uma base fixa feita em aço que serve para sustentar um suporte móvel, usado como base para os módulos fotovoltaicos. A base móvel, construída em alumínio, é acoplada à parte fixa através de dois rolamentos. O centro de gravidade do plano formado pelos módulos fotovoltaicos está localizado no eixo de rotação do sistema, o que se reflete em um equilíbrio mecânico indiferente deste plano e na exigência de um torque menor para rotacionar a estrutura. A Figura 3.1 e Figura 3.2 mostram a base fixa e o conjunto montado, respectivamente.



Figura 3.1 – Base fixa.



Figura 3.2 – Base fixa e plano móvel.

Na Figura 3.2 também pode ser observada a posição escolhida para a fixação da unidade motora, dispositivo responsável pelo movimento de rotação do arranjo. O movimento é feito a partir de um cabo de aço fixado no ponto médio do lado Oeste do plano móvel. Este cabo é enrolado ou desenrolado pela unidade motora dependendo do sentido de rotação. A unidade motora, mostrada na Figura 3.3 e Figura 3.4, é formada por um motor de corrente contínua (CC) de 12V, uma caixa de redução de velocidade com fator 30:1 e um carretel, no qual o cabo de aço é enrolado ou desenrolado.



Figura 3.3 – Unidade motora.



Figura 3.4 – Sistema de tracionamento.

Alguns cuidados foram tomados na construção da estrutura mecânica. Os principais cuidados foram evitar que a estrutura limite demasiadamente os ângulos máximos de inclinação do arranjo e também que a mesma exija um torque elevado do motor, uma vez que a não utilização de baterias para alimentá-lo impediria o funcionamento do rastreador para níveis muito baixos de irradiância, como ao amanhecer. Neste caso, mesmo que o arranjo fotovoltaico fosse capaz de gerar energia

suficiente para alimentar o sistema eletrônico de controle, não haveria uma geração de energia suficiente para alimentar o motor. Para a estrutura montada, os ângulos máximos de inclinação do arranjo são de 70 graus para Leste e Oeste, o que corresponde a um ângulo total de rastreamento de 140 graus.

Para diminuir o torque no motor, e conseqüentemente a corrente elétrica exigida pelo mesmo, é utilizada uma caixa de redução de velocidade, que aumenta o torque fornecido pelo mesmo. Também para aumentar o torque do motor, o cabo de aço usado para mover a estrutura é fixado nos módulos fotovoltaicos, aumentando a distância entre o ponto de tracionamento e o eixo de rotação do plano, conforme mostrado na Figura 3.4. Com a configuração na qual foi montado, o sistema leva cerca de um minuto para realizar o trajeto de sua posição inicial até sua posição final em um movimento sem interrupção (retorno).

O procedimento implementado para a transmissão de movimento da unidade motora para o arranjo exige um desequilíbrio na estrutura, inserido através de um contrapeso fixado no lado oposto ao lado de fixação do cabo. Este contrapeso exerce sobre a estrutura uma força que mantém o cabo de aço sempre tensionado, garantindo estabilidade à estrutura e proteção contra ventos intensos. Sua utilização também acrescentou ao sistema a característica de armazenar energia potencial ao longo do dia, utilizando esta energia para diminuir a corrente elétrica necessária para acionar o motor no movimento de retorno, uma vez que o torque exercido pelo contrapeso atua sempre a favor deste movimento. Dessa forma, o desequilíbrio inserido ajuda a realizar o retorno do arranjo ao amanhecer, quando se tem uma baixa irradiância solar e o arranjo se encontra virado para o lado contrário ao nascimento do Sol.

Sobre a estrutura mecânica montada foram utilizados quatro módulos fotovoltaicos policristalinos modelo MSX56, cada qual com potência máxima de 56 Watts, totalizando uma potência máxima para o arranjo de cerca de 220 Watts. Os módulos possuem dimensões de 111,3cm de comprimento por 50,2cm de largura, e pesam cerca de 7,2kg cada. A Figura 3.5 mostra o sistema montado sobre bases de concreto, que servem para fornecer a inclinação desejada ao arranjo.



Figura 3.5 – Sistema de rastreamento desenvolvido, (a) vista Leste e (b) vista Oeste.

3.2 Sistema Eletrônico de Controle

O sistema de controle corresponde a toda parte eletrônica do dispositivo de rastreamento, desde os sensores até o circuito de acionamento do motor. Este sistema foi implementado através de eletrônica analógica e digital, priorizando sempre a simplicidade e o baixo custo, sem, no entanto, comprometer sua confiabilidade e eficiência.

A Figura 3.6 mostra o protótipo do sistema eletrônico de controle montado. Este mesmo circuito foi utilizado na realização de testes e experimentos para verificação de funcionamento, tendo sido alojado em uma caixa plástica totalmente fechada e fixada sob um dos módulos fotovoltaicos usados no sistema de rastreamento, conforme Figura 3.7.

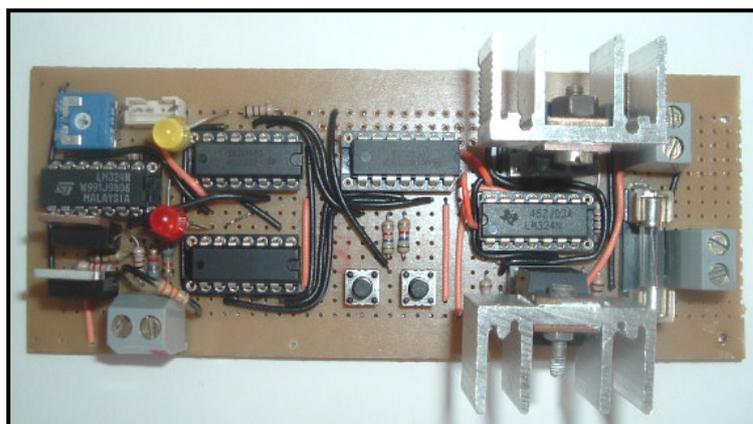


Figura 3.6 – Sistema eletrônico de controle.

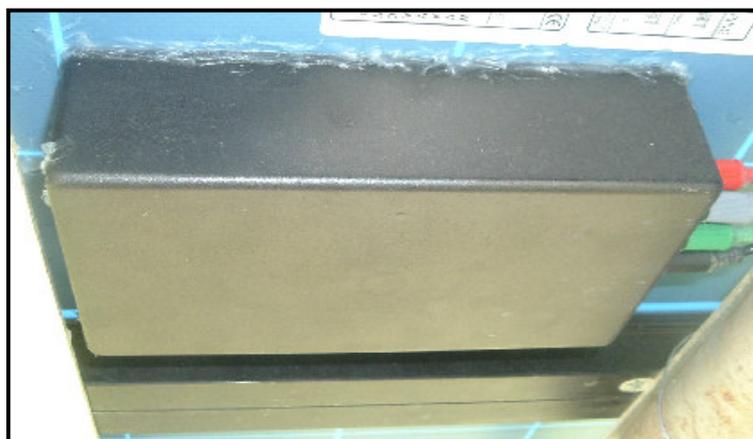


Figura 3.7 – Sistema fixado sob um módulo.

O diagrama de blocos do sistema eletrônico de controle é mostrado na Figura 3.8.

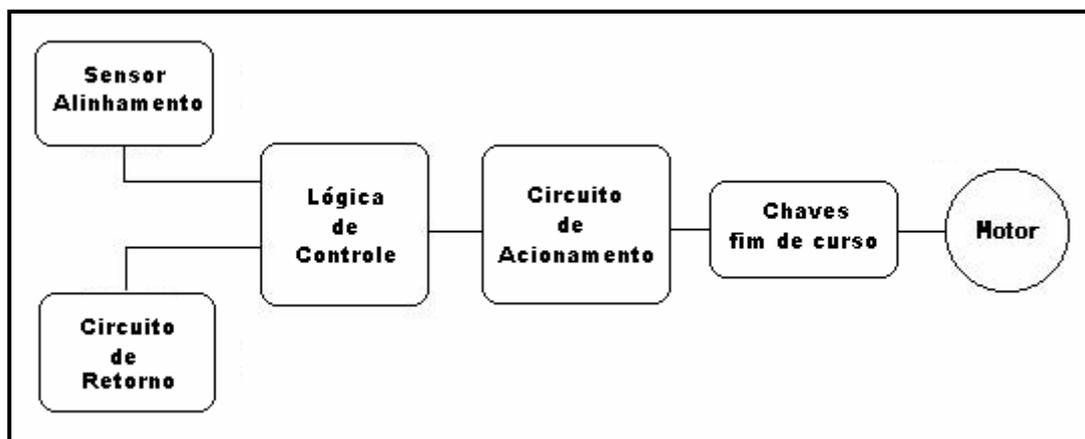


Figura 3.8 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico de controle.

Os sensores geram em suas saídas sinais digitais que são monitorados constantemente pela lógica de controle. O sensor de alinhamento é responsável pelo movimento do arranjo no sentido Leste-Oeste, isto é, pelo acompanhamento do Sol ao longo do dia. O circuito de retorno é responsável pelo movimento do arranjo no sentido Oeste-Leste, realizando o retorno deste ao amanhecer. A lógica de controle evita que ocorra qualquer conflito entre os sinais dos sensores e também implementa um controle manual para o sistema de rastreamento. O circuito de acionamento recebe os sinais digitais da lógica de controle e a partir destes aciona o motor com o sentido de rotação desejado. As chaves fim de curso servem como limites para o movimento do arranjo e definem as máximas inclinações a Leste e a Oeste atingíveis pelo arranjo.

3.2.1 Sensor de Alinhamento

O sensor de alinhamento é responsável por enviar os comandos que acionam o acompanhamento do Sol ao longo do dia, sendo feito através de um sinal digital em sua saída. Este sensor foi implementado a partir de dois LDR's, fixados em uma estrutura apropriada, juntamente com componentes eletrônicos analógicos básicos. A Figura 3.9 mostra o circuito eletrônico do sensor de alinhamento. Os sinais de tensão presentes sobre os LDR's são constantemente comparados através de um comparador de tensão com histerese. REF é um LDR usado para obtenção de uma irradiância de referência e é posicionado de forma a receber constantemente a radiação solar durante o rastreamento. TRK é sombreado pela estrutura na qual os LDR's estão fixados sempre que o arranjo fotovoltaico fica desalinhado com o Sol, conforme mostrado na Figura 3.10.

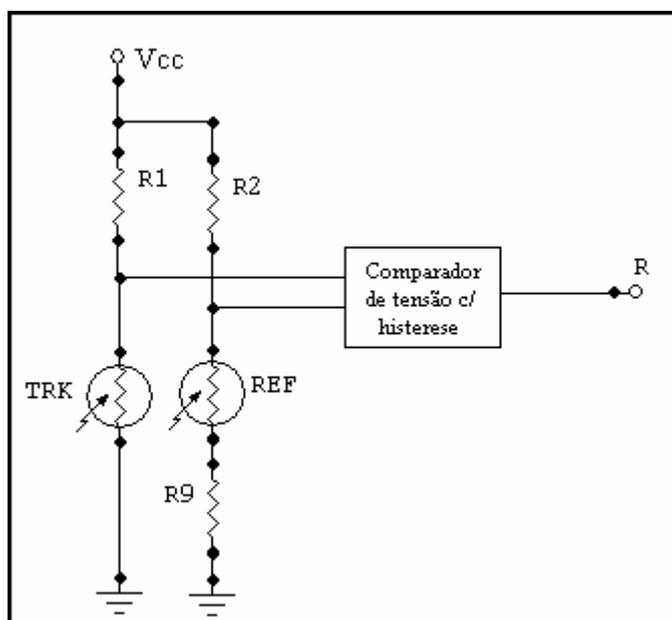


Figura 3.9 – Sensor de Alinhamento.

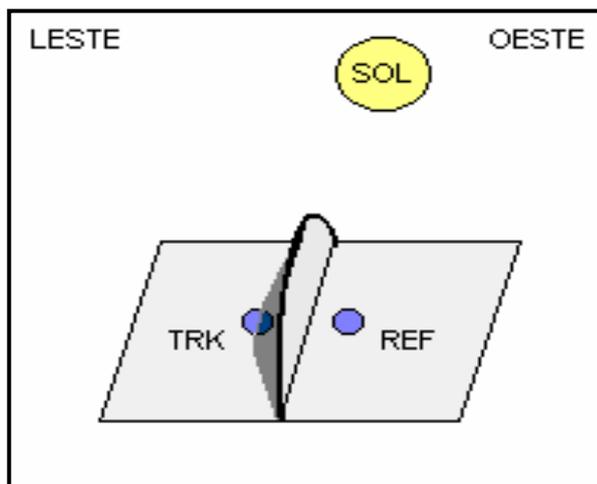


Figura 3.10 – Estrutura de suporte dos LDR's.

A estrutura usada para fixar os LDR's tem um formato tal que, com o movimento do Sol ao longo do dia, a sombra sobre TRK aumenta, enquanto o REF permanece iluminado pelo Sol. Isto provoca uma diferença entre as irradiâncias recebidas pelos dois LDR's, e conseqüentemente uma diferença entre as tensões sobre estes componentes. O circuito comparador de tensão recebe o sinal diferença e, ao perceber uma tensão em TRK maior que a tensão lida em REF, coloca em sua saída R um sinal de tensão alto, que comanda o acionamento do motor no sentido de rotação que realinha o arranjo fotovoltaico. Com o movimento de alinhamento, a sombra formada pela estrutura sobre TRK diminui até que sua tensão seja inferior à tensão sobre o LDR de referência, e o movimento é então encerrado até que haja um novo desalinhamento entre o arranjo e o Sol.

A histerese existente no circuito comparador exige uma diferença mínima entre os sinais de tensões comparados para que haja alguma mudança na tensão de saída do comparador. Esta diferença pode ser ajustada no circuito comparador e serve para evitar um número elevado de acionamentos do motor durante o funcionamento do rastreador.

Aumentando a diferença mínima exigida entre os sinais de tensão ocorre uma conseqüente diminuição da quantidade de acionamentos, com cada acionamento se prolongando por um período de tempo longo. Uma diminuição da diferença mínima de tensão ocasiona um aumento do número de acionamentos que passam a ter durações curtas. O melhor ajuste é conseguido através de testes com o rastreador em funcionamento.

Como o movimento de acompanhamento do Sol é acionado conforme a área sombreada de TRK, o formato dado à estrutura que suporta os LDR's também influencia diretamente na precisão do rastreador. Quanto maior a altura do plano que gera a sombra, maior será a precisão no rastreamento, uma vez que, pequenos desvios entre o arranjo e o Sol geram uma sombra suficiente para ativar o rastreamento. Porém, quanto maior a área deste plano, maior a possibilidade do sistema ser influenciado pela incidência de ventos. O uso de um semicírculo para gerar a sombra, mostrado na Figura 3.10, garante uma diminuição da área total e do efeito da mudança de posição do Sol ao longo das estações do ano.

Ainda é possível diminuir a área do plano que gera a sombra se a estrutura de suporte dos LDR's estiver posicionada com inclinação equivalente à latitude local. Neste caso, a largura necessária ao plano corresponde à medida da sua altura. A Figura 3.11 mostra a estrutura utilizada no projeto. Uma vez que o suporte dos LDR's foi fixado no mesmo plano do arranjo fotovoltaico, e este possui inclinação correspondente à latitude de Recife, a área do plano pôde ser diminuída conforme comentado anteriormente, possuindo altura e largura de 18cm. Esta estrutura foi feita a partir de

uma chapa de alumínio, onde foram realizados cortes e dobras necessárias, e pintada na cor preta fosco, para evitar que reflexões da luz solar incidam sobre os LDR's.

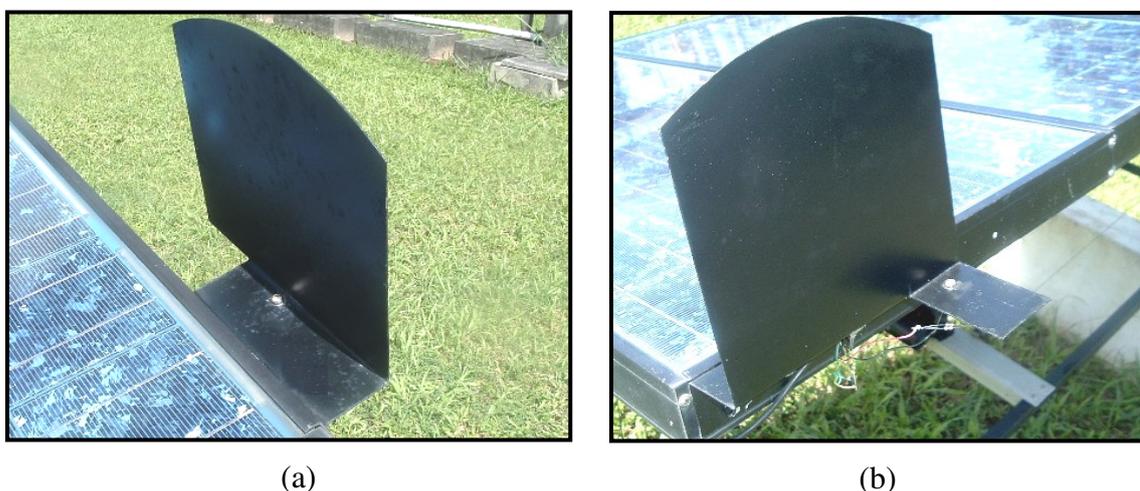


Figura 3.11 – Estrutura usada no projeto para suporte dos LDR's (a) TRK e (b) REF.

O sensor de alinhamento projetado permite apenas seguir o Sol à medida que este passa da posição do arranjo, isto é, através do acionamento do motor em um único sentido de rotação (Leste-Oeste). Assim, não é possível focalizar o Sol caso este se encontre numa posição anterior ao arranjo fotovoltaico. Embora isto possa parecer à primeira vista uma limitação do sensor de alinhamento, esta configuração simplifica o circuito e fornece praticamente o mesmo ganho de um circuito capaz de comandar o retorno do arranjo para focalizar o Sol.

Uma vez que o Sol tem seu movimento ao longo do dia em um único sentido, apenas um erro no seu acompanhamento pode levar o arranjo a estar adiantado em relação ao Sol. Este erro normalmente ocorre devido à falta de exatidão apresentada pelos rastreadores solares para baixas irradiâncias, principalmente em dias nublados, quando se tem uma forte presença da radiação difusa na composição da radiação total

que chega aos módulos fotovoltaicos e sensores. Nesta situação não há vantagem em realizar um rastreamento do Sol, porque a maior parte da radiação chega ao arranjo fotovoltaico em todas as direções de forma praticamente uniforme.

Como o sensor de alinhamento tem seu funcionamento baseado na comparação das irradiâncias que incidem sobre seus dois LDR's, uma predominância da radiação difusa compromete sua precisão e pode acarretar em um adiantamento do arranjo em relação ao Sol. Como solução, o circuito eletrônico do sensor de alinhamento apenas aciona o rastreio se houver uma quantidade suficiente de radiação direta na composição da radiação total que permita aos LDR's localizar o Sol com boa segurança. Isto é feito com o uso do resistor R9 em série com o LDR de referência (Figura 3.9). Quanto maior o valor usado para este resistor, maior a quantidade da radiação direta necessária para que haja acompanhamento. O valor para R9 usado no protótipo foi encontrado através de testes e experimentos com o rastreador em funcionamento.

Dessa forma, o sistema de rastreamento montado tem o seu movimento de seguimento do Sol ao longo do dia interrompido pela presença de nuvens, permanecendo parado até que o Sol reapareça, quando então se realinha ao mesmo.

3.2.2 Circuito de Retorno

O sistema de rastreamento deve ser capaz de realizar o retorno do arranjo fotovoltaico à sua posição inicial (máxima inclinação para o Leste) e coletar o máximo da radiação do Sol ao amanhecer. O circuito de retorno é responsável pelo comando deste procedimento e deve funcionar corretamente sob qualquer condição de irradiância.

Na grande maioria dos sistemas de rastreamento ativos que fazem uso de circuitos eletrônicos para controlar o(s) motor(es), o circuito de retorno é baseado em um sensor que usa um componente óptico-eletrônico, normalmente um LDR, em sua implementação. Nestes sistemas, o retorno é realizado ao anoitecer, quando o nível de irradiância solar torna-se inferior a um nível pré-definido.

O retorno ao anoitecer, quando se tem um nível muito baixo de irradiância, somente é possível nesses sistemas com o uso de baterias para alimentar seus circuitos eletrônicos e motores. Uma vez que o projeto desenvolvido neste trabalho não faz uso de baterias, o retorno do arranjo é realizado ao amanhecer, quando se dispõe de uma irradiância solar suficiente para alimentar, através dos módulos fotovoltaicos, o sistema eletrônico de controle e o motor do sistema.

Sendo o retorno realizado ao amanhecer, torna-se desnecessário o uso de um componente óptico-eletrônico para monitorar a irradiância solar. A operação de retorno será iniciada a partir do instante em que a irradiância for suficientemente alta para alimentar o sistema. Para tanto, é necessário que o circuito eletrônico comande o retorno do arranjo imediatamente após ser alimentado, isto é, logo após ser ligado. Esta foi a idéia básica utilizada no desenvolvimento da eletrônica responsável pelo retorno do arranjo. O sistema acompanha o Sol durante o dia até a sua posição final, ou antes desta, caso o tempo se torne nublado, permanecendo inativo durante o período noturno, quando não há qualquer fonte de energia para alimentação do circuito eletrônico de controle e motor. Com o amanhecer, a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico aumenta gradativamente, até um nível suficiente para iniciar o funcionamento do sistema

eletrônico de controle, que aciona o retorno do arranjo à sua posição inicial, independente do ponto onde o arranjo se encontre.

A Figura 3.12 mostra uma representação em bloco para o circuito de retorno utilizado no projeto. Este circuito é formado basicamente por um retificador controlado de silício (SCR⁷). De forma bastante simples, este componente eletrônico permite a passagem de corrente elétrica entrando pelo anodo (A) e saindo pelo catodo (K) somente após receber um pulso de corrente no terminal chamado porta (G). Assim, aplicando-se uma tensão positiva entre os terminais A e K, não haverá condução de corrente até que seja aplicado um pulso de corrente no terminal G. Com a aplicação deste pulso, o SCR passa a conduzir a corrente elétrica, permanecendo neste estado até que a tensão entre os terminais A e K seja nula.

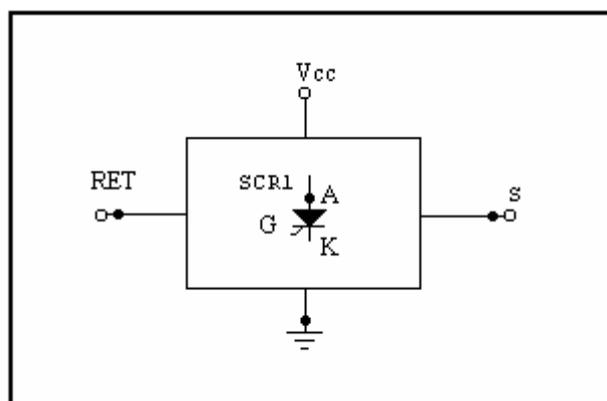


Figura 3.12 – Circuito de retorno.

⁷ Retificador controlado de silício. Componentes eletrônicos usados principalmente para retificar e controlar tensões alternadas. Mantida a sigla do Inglês Silicon Controlled Rectifier por ser consagrada no Português.

A saída S do circuito de retorno apresenta uma tensão V_{cc} sempre que o circuito está alimentado e o SCR não está conduzindo. Quando o SCR está conduzindo, S possui nível de tensão nulo. O circuito de retorno montado apresenta em sua saída uma tensão V_{cc} imediatamente após ligado (alimentado), mudando sua saída para nível de tensão nula após receber um pulso de corrente na entrada RET. Uma vez recebido este pulso, a saída permanece com tensão nula até que o circuito seja religado.

No protótipo montado, a tensão que alimenta o circuito de retorno é nula durante a noite devido à falta de radiação solar e ausência de baterias. Dessa forma, a tensão produzida pelos módulos do sistema ao amanhecer liga o circuito de retorno, aparecendo em S uma tensão V_{cc} . Esta tensão de nível alto comanda o retorno do sistema a sua posição inicial.

O retorno é desativado através da entrada RET. No protótipo, foi utilizada uma chave fim de curso, localizada na posição inicial do arranjo, para enviar o pulso de corrente para esta entrada. Com o retorno desativado, o sistema passa a acompanhar o Sol ao longo do dia, permanece inativo durante a noite e reinicia todo o ciclo no dia seguinte.

3.2.3 Lógica de Controle

A lógica de controle é a parte do sistema de controle que recebe os sinais dos sensores de alinhamento e retorno. Implementada basicamente por portas lógicas, esta parte do circuito aciona o motor, através do circuito de acionamento, decidindo o sentido do movimento. Controles manuais foram adicionados nesta parte do circuito, de

forma que o usuário pode acionar manualmente o movimento do arranjo nos sentidos Leste e Oeste.

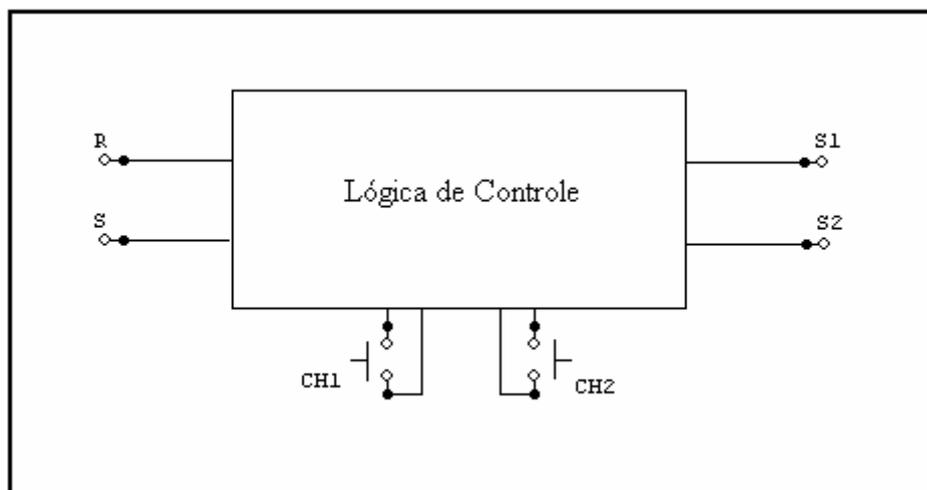


Figura 3.13 – Circuito lógico de controle.

A Figura 3.13 mostra o bloco correspondente à lógica de controle implementada. Este circuito faz uma monitoração contínua dos sinais vindos dos sensores de alinhamento e retorno através das entradas R e S, e das chaves de controle manual CH1 e CH2, acionando o movimento através das saídas S1 e S2. O controle manual possui prioridade sobre os sensores, de forma que o acionamento de umas das chaves desativa os sinais dos sensores. A saída S1 é responsável pelo acionamento do motor no sentido Oeste e a saída S2 no sentido Leste. Estas saídas comandam o acionamento do motor sempre em instantes diferentes, como forma de evitar danos ao circuito de acionamento e ao motor.

3.2.4 Circuito de Acionamento

O circuito de acionamento do motor é responsável pela ligação entre a lógica de controle e o motor de corrente contínua (CC) que movimenta o arranjo fotovoltaico. No rastreador desenvolvido este bloco foi implementado por uma ponte H com transistores MOSFET de potência (MCBRIDE, 2002), controlados por circuitos comparadores de tensão implementados com amplificadores operacionais. O uso de amplificadores operacionais tem as vantagens de diminuir os custos e realizar um isolamento entre os sinais digitais provenientes da lógica de controle e a tensão usada na alimentação do motor, o que facilita o uso de motores com diferentes tensões e potências. São também componentes encontrados facilmente no mercado local. A Figura 3.14 mostra o bloco do circuito eletrônico de acionamento implementado.

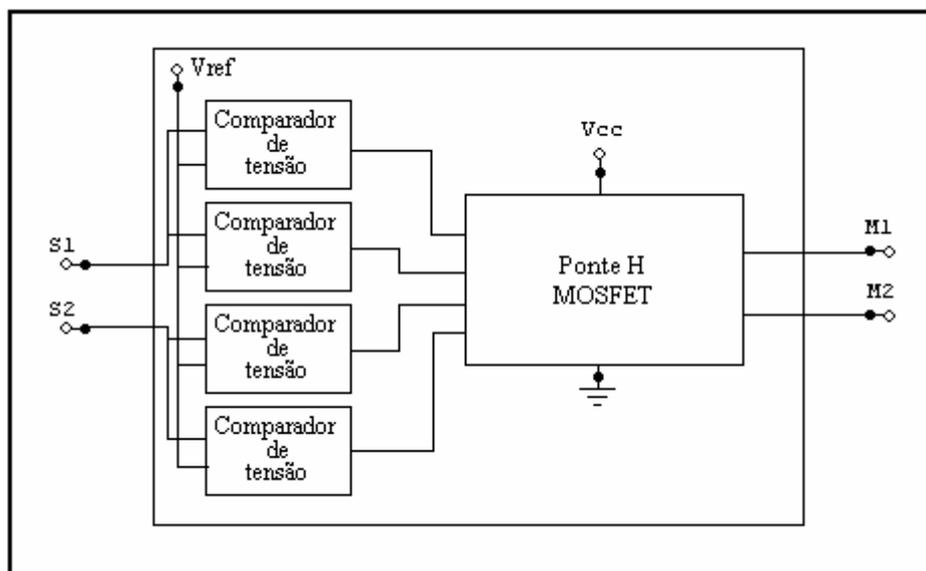


Figura 3.14 – Circuito de acionamento.

As entradas S1 e S2 recebem os sinais digitais provenientes da lógica de controle. Cada um destes sinais alimenta a entrada de dois comparadores de tensões, onde são comparados com uma tensão de referência V_{ref} obtida através de um divisor de tensão. Dessa forma, S1 em nível alto leva a ponte H a apresentar tensão V_{cc} na saída M1 e tensão nula em M2, acionando o movimento do motor em um determinado sentido de rotação. No projeto montado, S1 comanda o movimento do arranjo no sentido Oeste, e é responsável pelo seguimento do Sol ao longo do dia. De forma semelhante, S2 em nível alto faz M1 apresentar tensão nula e M2 tensão V_{cc} , girando a estrutura no sentido Leste e realizando o retorno à posição inicial. Todos os componentes utilizados no circuito de acionamento são de baixo custo e facilmente encontrados no mercado local.

3.2.5 Chaves fim de curso

Chaves fim de curso são essenciais para o funcionamento adequado de sistemas de rastreamento que utilizam circuitos eletrônicos de controle. Elas possuem a função de limitar o movimento do arranjo, definindo os seus ângulos máximos de inclinação para Leste e para Oeste. Para isto, são usadas uma chave (K1) para o limite correspondente à posição inicial do arranjo (máxima inclinação para Leste) e outra chave (K2) para a posição final do arranjo (máxima inclinação para Oeste). Também são usados dois diodos (D1 e D2) que servem de caminho alternativo para corrente elétrica e permitem que o motor (M) gire no sentido contrário ao de atuação de uma chave. O diagrama da Figura 3.15 mostra o esquema elétrico que implementa as chaves de fim de curso e o funcionamento das mesmas em todas as situações possíveis.

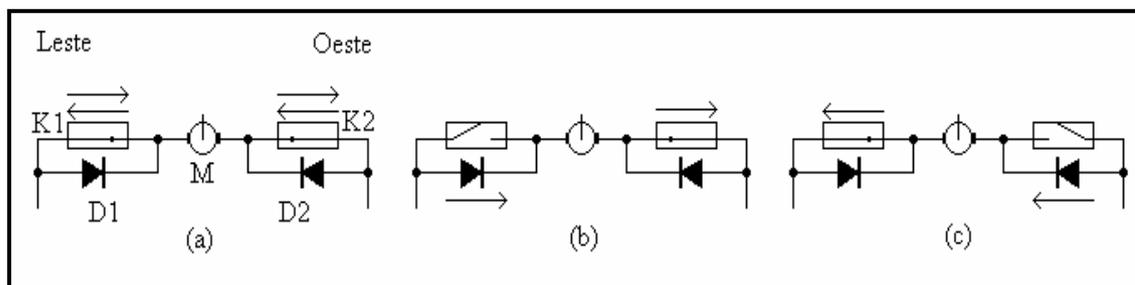


Figura 3.15 – Diagrama esquemático e funcional das chaves fim de curso.

A primeira situação, mostrada na Figura 3.15(a), corresponde à operação normal das chaves, isto é, quando o arranjo fotovoltaico encontra-se em alguma posição entre as chaves K1 e K2. Nesta situação, ambas as chaves encontram-se fechadas e conduzem a corrente elétrica nos dois sentidos, permitindo que o motor gire nos sentidos horário e anti-horário e, conseqüentemente, o arranjo possa se movimentar para Leste e Oeste. Cabe observar, ainda, que nesta situação, nenhuma corrente elétrica circula pelos diodos.

Na Figura 3.15(b), tem-se o arranjo na posição inicial, com a chave K1 bloqueando o movimento do arranjo no sentido Leste. Apesar de K1 estar aberta, é possível o movimento do arranjo no sentido Oeste usando o diodo D1 como meio de condução da corrente elétrica até o motor. O diodo D1 atua somente na condição da chave K1 aberta.

Por fim, para o caso mostrado na Figura 3.15(c), o arranjo está na posição final e tem seu movimento no sentido Oeste bloqueado pela chave K2. Semelhante ao caso anterior, é possível o movimento no sentido Leste, com a corrente elétrica passando por D2 para chegar até o motor. O diodo D2 atua na condução de corrente elétrica apenas com K2 aberta. Na Figura 3.16 e Figura 3.17 são mostradas as chaves implementadas

no protótipo. No primeiro caso, ambas as chaves estão desativadas, e no segundo caso, a chave K2 está acionada pelo arranjo que se encontra em sua posição final.

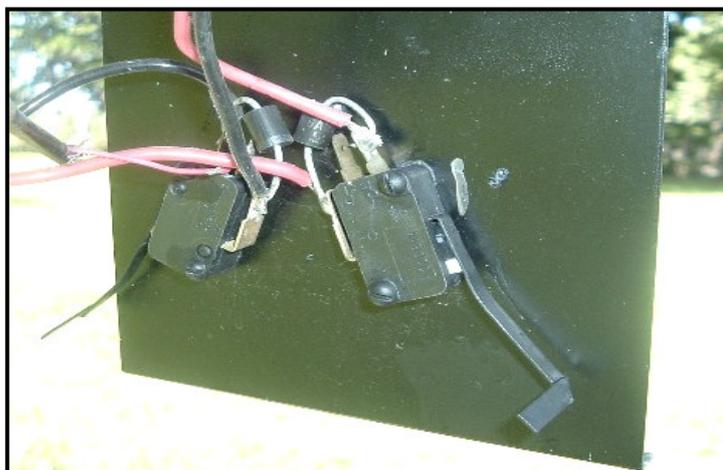


Figura 3.16 – Chaves fim de curso.

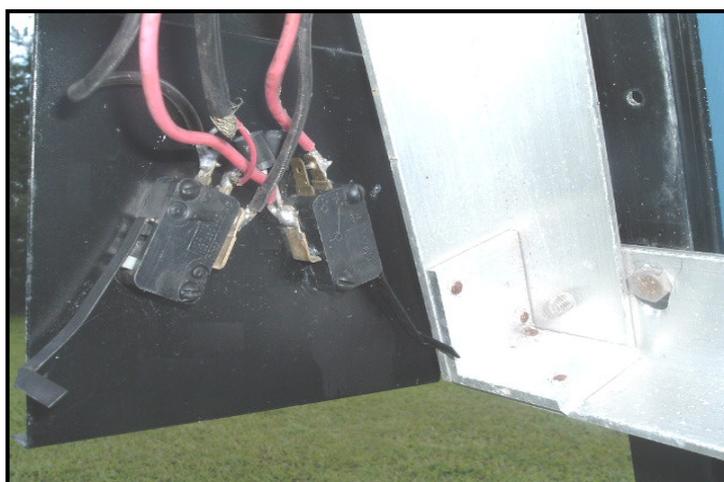


Figura 3.17 – Chave fim de curso acionada.

É importante ressaltar que as chaves fim de curso devem operar antes que os limites mecânicos sejam atingidos. Atingir tais limites sem que as chaves bloqueiem o movimento, faz o motor drenar correntes elétricas altas e pode danificar tanto a parte eletrônica quanto a parte mecânica do rastreador.

3.3 Metodologia de Teste do Protótipo

O protótipo teve seu funcionamento testado através de experimentos com o rastreador posto em funcionamento na Área de Testes do Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia – Grupo FAE, onde foi possível estudar o comportamento do sistema para as mais diversas condições de tempo. Também foram realizadas medidas de irradiância e de posicionamento do plano do arranjo ao longo do dia, com o objetivo de estimar o ganho em energia coletada proporcionado pelo uso do rastreador em relação a um sistema fixo e a precisão do sistema no acompanhamento do Sol.

As irradiâncias incidentes no plano de um sistema fixo e no plano do arranjo fotovoltaico com o rastreador foram medidas através de piranômetros LICOR modelo LI-200SA, piranômetro do tipo fotovoltaico com erro de calibração típico de 3%. Estes piranômetros foram calibrados a partir de um piranômetro de precisão do tipo térmico EPPLEY PSP. Foram também medidas as intensidades de radiação total e difusa incidentes no plano horizontal com a utilização de piranômetros EPPLEY. Na Figura 3.18 é mostrado o modelo de piranômetro usado na medição da irradiância no plano do rastreador e no plano fixo e na Figura 3.19 tem-se o piranômetro de precisão EPPLEY PSP.



Figura 3.18 – Piranômetro LI-200SA.



Figura 3.19 – Piranômetro PSP.

Os dados medidos pelos sensores foram coletados através de um sistema de aquisição de dados. Foi utilizado um datalogger Campbell Scientific modelo CR10X, mostrado na Figura 3.20, programado para realizar leituras em intervalos de um segundo e fornecer valores médios para um minuto. As medidas de irradiância foram

realizadas entre os dias 19 de Maio (dia juliano⁸ 139) e 05 de Junho de 2006 (dia juliano 156).

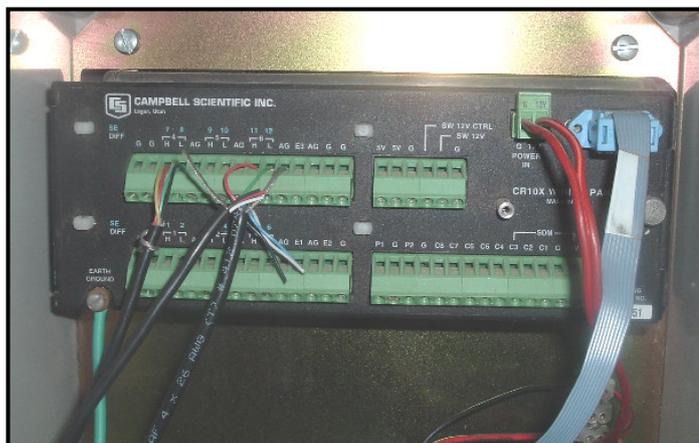


Figura 3.20 – Datalogger CR10X.



Figura 3.21 – Goniômetro.

A posição do plano do rastreador foi medida manualmente com o uso do goniômetro da Figura 3.21, instrumento com erro de até 0,5 graus. Para isto, foi definido inicialmente um sistema de coordenadas X, Y, Z local (Recife). Neste sistema de coordenadas, mostrado na Figura 3.22(a), o eixo Z corresponde à linha Norte-Sul,

⁸ Dia do ano contado de forma corrida, onde o dia 1 equivale a 01 de Janeiro e o dia 365 equivale a 31 de Dezembro.

apontando para o Norte, X coincide com a vertical local e Y com a direção Leste-Oeste, positivo para o Leste. O plano (X, Z) é o plano meridiano que contém o Sol na hora do meio dia solar.

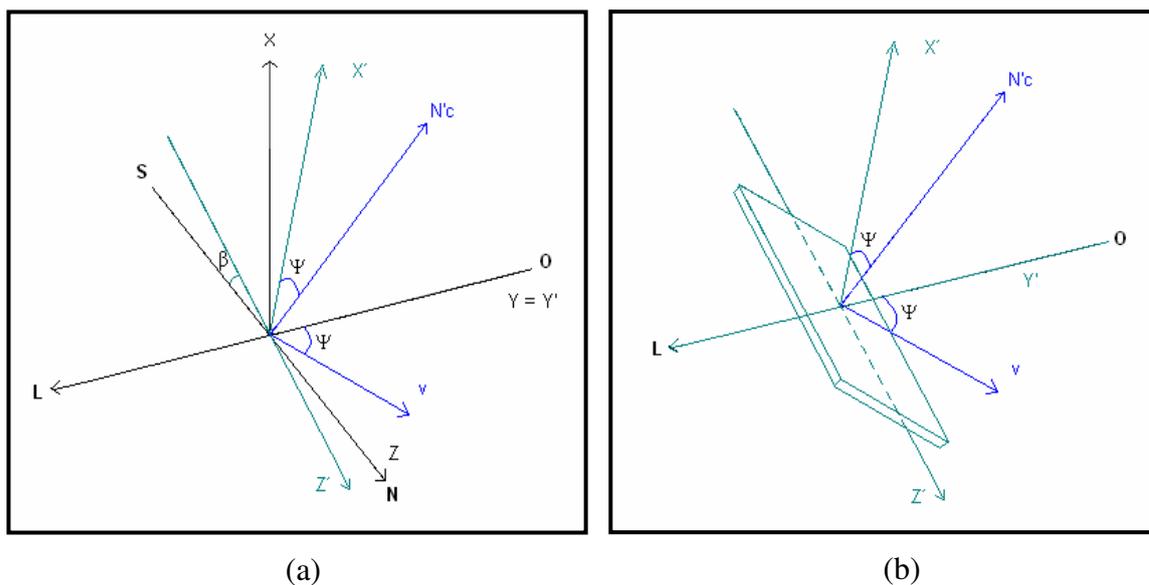


Figura 3.22 – Sistema de coordenadas (a) local e (b) do rastreador.

Girando o sistema (X, Y, Z) de um ângulo beta em torno do eixo Y, obtém-se o sistema (X', Y', Z'), onde $Y \equiv Y'$. O eixo Y' coincide também com a linha Leste-Oeste, como pode ser observado na Figura 3.22(a).

O rastreador é posicionado de forma que o eixo do seu plano também está inclinado de um ângulo beta com relação à horizontal, mais alto na parte Sul coincidente com o eixo Z', Figura 3.22(b). Desta forma, o plano do rastreador gira em torno do eixo Z' e sua normal, ($N'c$), só possui componentes em X' e Y'. Ao meio dia solar, a normal ao plano do rastreador coincide com o eixo X'. Ao longo do dia, esta normal gira em torno do eixo Z', e está sempre contida no plano (X', Y'). O ângulo de rastreo Ψ_{NS} é o ângulo entre a normal ($N'c$) a qualquer hora e o eixo X'.

No plano (X', Y') podem-se traçar retas perpendiculares aos lados do ângulo Ψ_{NS} , ou seja, ao eixo X' e a (N'_c) . Essas perpendiculares também formam um ângulo Ψ_{NS} entre elas. A perpendicular a X' é o eixo Y' (linha horizontal Leste-Oeste) e a normal a N'_c é um vetor v , também contido no plano (X', Y') . Como v é perpendicular a (N'_c) , normal ao plano do rastreador, v está contido no plano do rastreador. O vetor v é a interseção de dois planos, o plano (X', Y') e o plano do rastreador, materializado pela superfície dos módulos.

O plano de rastreio está definido de forma tal que as componentes do vetor radiação solar (N'_s) nos eixos X' e Y' são proporcionais às componentes X' e Y' do vetor perpendicular ao plano de rastreio (N'_c) . Ou seja,

$$\frac{N'_{s,x}}{N'_{c,x}} = \frac{N'_{s,y}}{N'_{c,y}} \quad (1)$$

Isto significa que o vetor perpendicular ao plano de rastreio (N'_c) é paralelo em todo momento à projeção dos raios solares no plano (X', Y') . Não existe condição nenhuma com relação à componente Z' da radiação solar, que é livre devido ao rastreamento se dar em torno de um único eixo.

O ângulo Ψ_{NS} foi medido através do ângulo formado pelos vetores Y' e v . O vetor Y' coincide com a linha horizontal Leste-Oeste e pôde ser materializado com o nível de água do goniômetro da Figura 3.21. O eixo v foi materializado com a base do instrumento citado, apoiada no plano de rastreio e perpendicular ao eixo Z' .

As medições do ângulo Ψ_{NS} foram realizadas em intervalos de dez minutos nos dias 01 e 05 de Junho de 2006 (dias julianos 152 e 156). Com estas medidas foi possível avaliar o erro apresentado pelo rastreador durante o seguimento do Sol. Para isso, os

valores obtidos experimentalmente foram comparados com os valores de Ψ_{NS} , calculados analiticamente através da expressão (RABL, 1985),

$$tg \Psi_{NS} = \frac{sen \omega}{cos \omega \cdot cos(\lambda - \beta) + tg \delta \cdot sen(\lambda - \beta)} \quad (2)$$

Onde:

ω é o ângulo horário;

λ é latitude do local;

β é o ângulo de inclinação do eixo do plano do rastreador em relação à horizontal;

δ é a declinação solar.

Para o protótipo montado, o eixo do plano do rastreador tem uma inclinação igual à latitude da cidade de Recife ($\beta = \lambda$). Aplicando esta igualdade a Equação 1, tem-se

$$\Psi_{NS} = \omega \quad (3)$$

O ângulo horário é dado pela equação

$$\omega = 360 \cdot \frac{(h - 12)}{24} \quad (4)$$

Onde h é a hora solar. A hora solar está relacionada com a hora padrão (hora observada no relógio) pela equação

$$h = E + \frac{4 \cdot (L_p - L_l) + ET}{60} \quad (5)$$

Onde:

E corresponde a hora padrão local;

L_p é a longitude padrão (longitude de Brasília);

L_l é a longitude local (longitude de Recife);

ET é a equação do tempo, dada por

$$ET = 9,87 \cdot \text{sen}(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \text{cos}(B) - 1,5 \cdot \text{sen}(B) \quad (6)$$

Onde:

$$B = \frac{360 \cdot (N - 81)}{365} \quad (7)$$

e N é o dia juliano, $1 \leq N \leq 365$.

As medidas obtidas para o ângulo de rastreamento com o uso do goniômetro foram representadas, juntamente com os valores para este ângulo calculados através das equações citadas, em gráficos que permitem compará-las e avaliar o erro apresentado pelo rastreador no seguimento do Sol ao longo do dia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Irradiação Coletada nos Planos Fixo e com Rastreamento

Os dados de irradiância coletados experimentalmente em intervalos de um minuto foram plotados em gráficos com valores médios de dez minutos, o que tornou os gráficos mais legíveis. Os gráficos contêm os valores de irradiância incidentes nos planos de um sistema fixo e no plano do rastreador, além da irradiância difusa incidente no plano horizontal. Durante o período de realização das medidas ocorreram dias com as mais diversas condições de tempo, permitindo avaliar o desempenho do sistema de rastreamento para cada situação.

O gráfico apresentado na Figura 4.1 mostra as irradiâncias medidas no dia 20 de maio de 2006.

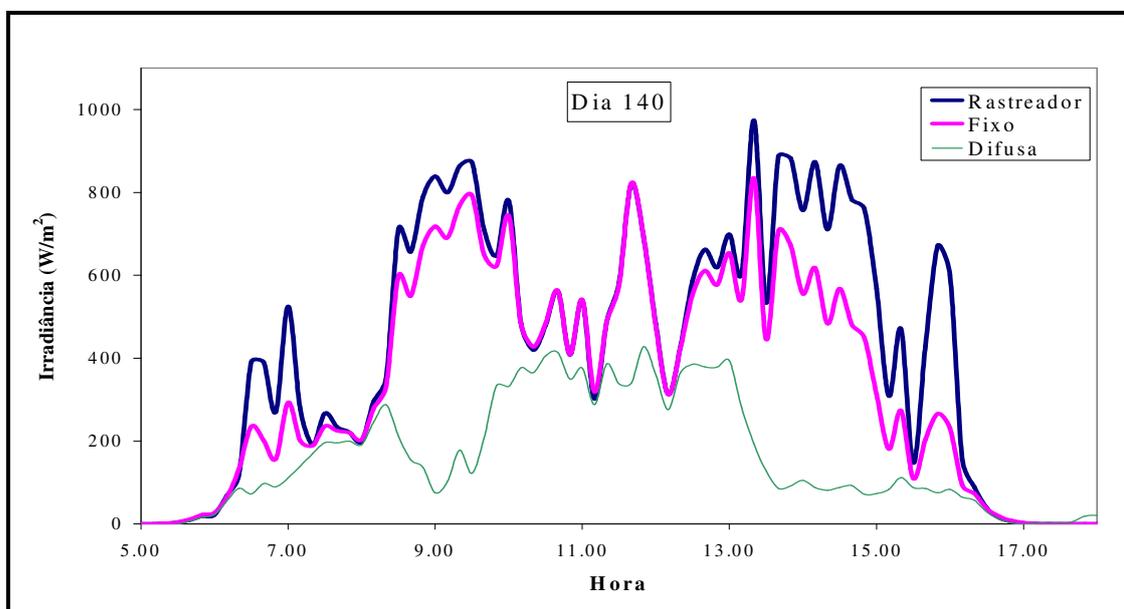


Figura 4.1 – Irradiância medida para o dia 20 de Maio de 2006 (dia juliano 140).

Pelo comportamento das irradiâncias observado neste gráfico, percebe-se que se tratou de um dia com tempo bastante instável, alternando entre situações de céu aberto e nublado. É possível verificar que o rastreador não experimenta ganho de energia em relação ao sistema fixo quando a maior parte da radiação presente é de origem difusa. Esta, como já foi comentada, é uma característica de qualquer rastreador, dada sua função de aumentar a coleção da radiação direta. Este efeito é evidente na Figura 4.1, onde no início da manhã o rastreador chegou a fornecer um ganho instantâneo de 90% passando a um ganho zero por volta das 8:00h. Tal como observado em simulação, o sistema com rastreador coleta a mesma energia que o sistema fixo ao meio dia solar, que correspondeu a um pouco depois das 11:00h no horário padrão local. O ganho na irradiação diária experimentado pelo uso do rastreador neste dia foi de 21%.

Na Figura 4.2 é mostrado o resultado das medições realizadas no dia 22 de Maio de 2006.

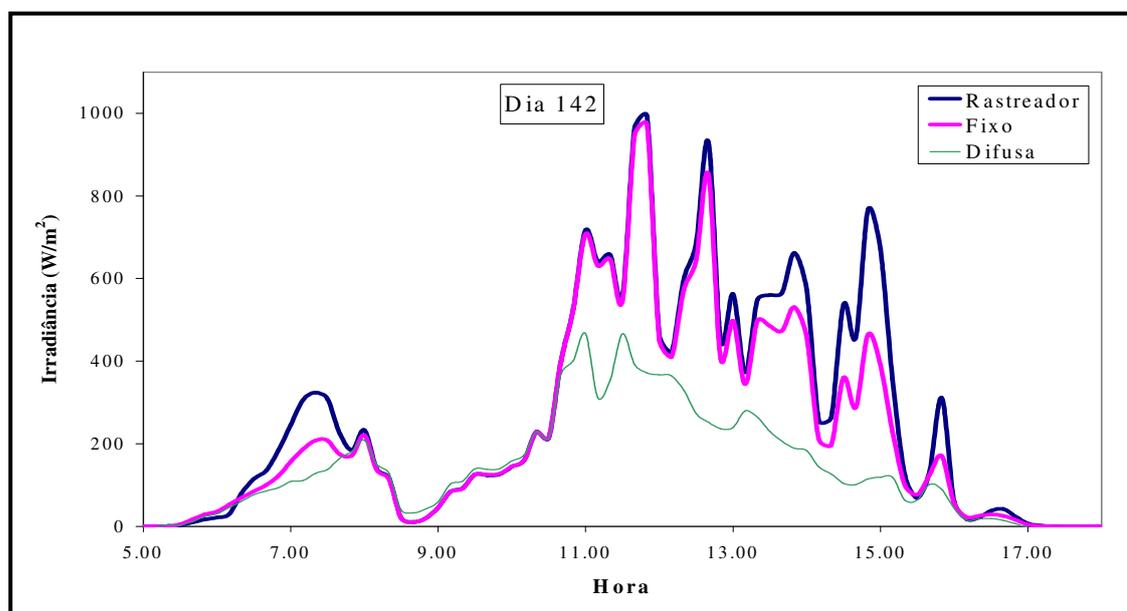


Figura 4.2 – Irradiância medida para o dia 22 de Maio de 2006 (dia juliano 142).

Semelhante ao mostrado anteriormente, tratou-se de um dia desfavorável para sistemas de rastreamento. Para este dia é possível observar uma coleção de energia pelo sistema com rastreador inferior ao sistema fixo no início da manhã, fato ocorrido devido ao rastreador não haver ainda retornado à sua posição inicial. Como o ganho fornecido por um rastreador na irradiação diária quando comparado a um sistema fixo aumenta à medida que haja uma menor quantidade de nuvens durante o dia, o ganho na irradiação observado para este dia foi inferior ao anterior (20 de Maio), tendo sido de 15%.

Para dias com pouca ou nenhuma nuvem o sistema obteve, evidentemente, um desempenho melhor. Os gráficos da Figura 4.3 e Figura 4.4 mostram as irradiâncias medidas nos dias 24 de Maio e 1º de Junho de 2006, respectivamente. Para estes dias foram obtidos ganhos na irradiação diária coletada de 31% e 30% respectivamente.

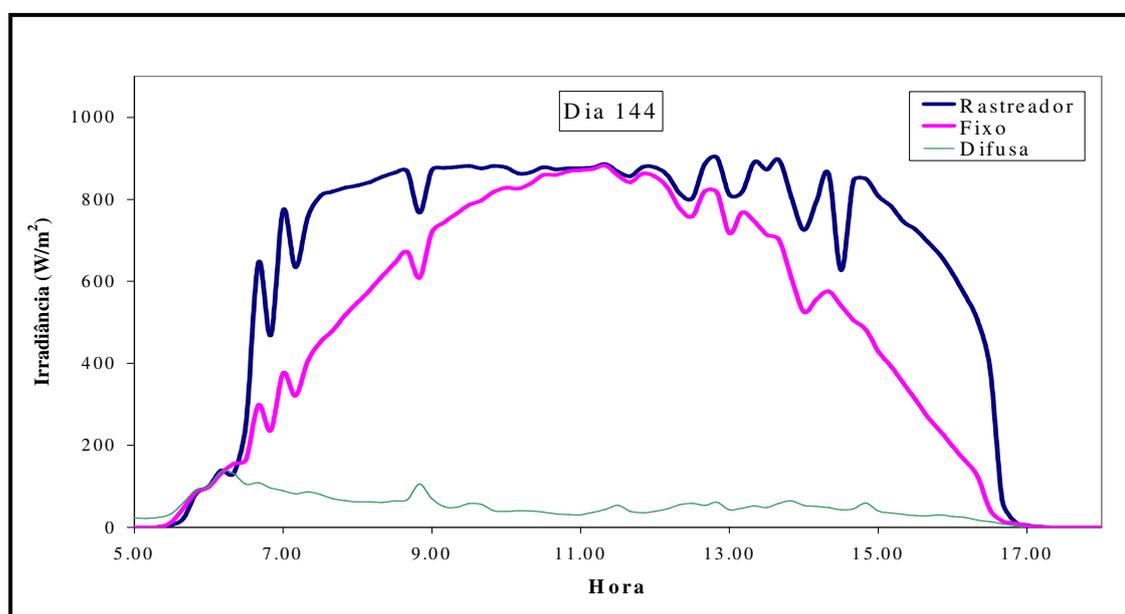


Figura 4.3 – Irradiância medida para o dia 24 de Maio de 2006 (dia juliano 144).

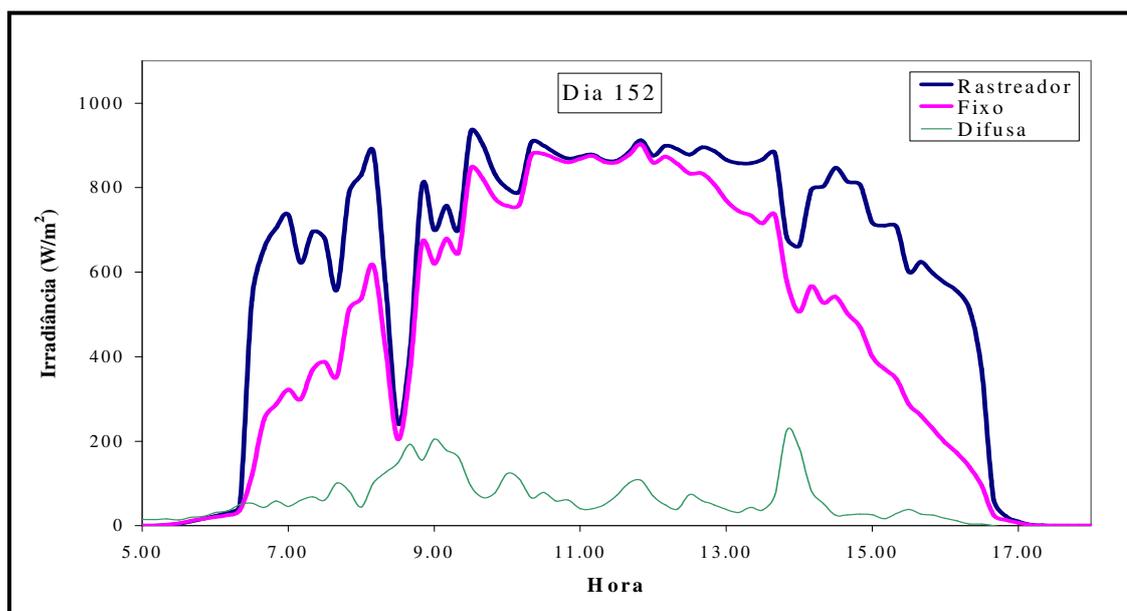


Figura 4.4 – Irradiância medida para o dia 01 de Junho de 2006 (dia juliano 152).

Estes gráficos deixam claro o ganho na energia coletada trazido com o uso do protótipo, sobretudo nas primeiras e últimas horas do dia. A existência de árvores e construções próximas ao local onde o protótipo foi instalado influenciou as medições para estas horas iniciais e finais, de forma que, os ganhos reais fornecidos pelo rastreador construído podem ser ainda maiores que os valores observados.

4.2 Precisão do Acompanhamento do Sol

As medidas experimentais da posição do plano do rastreador (ângulo de rastreio) ao longo do dia foram plotadas em gráficos juntamente com o ângulo de rastreio calculado analiticamente, de forma a permitir avaliar o erro cometido pelo sistema no acompanhamento do Sol.

Também foram inseridas nas figuras as irradiâncias medidas para o dia correspondente. Dessa forma, foi possível observar o comportamento do rastreador para os diferentes valores de irradiâncias ocorridos nos dias e horários em que foram realizadas as medidas de posição. Vale salientar, porém, que as medidas de posição são valores instantâneos lidos a cada dez minutos, enquanto as irradiâncias são valores médios para dez minutos de medições.

A Figura 4.5 mostra as curvas obtidas para o dia 01 de Junho de 2006. Como pode ser observado, altos níveis de irradiância estiveram presente durante praticamente todo o período no qual foram realizadas as medidas de posição, com exceção de um pequeno intervalo próximo as 14:00h.

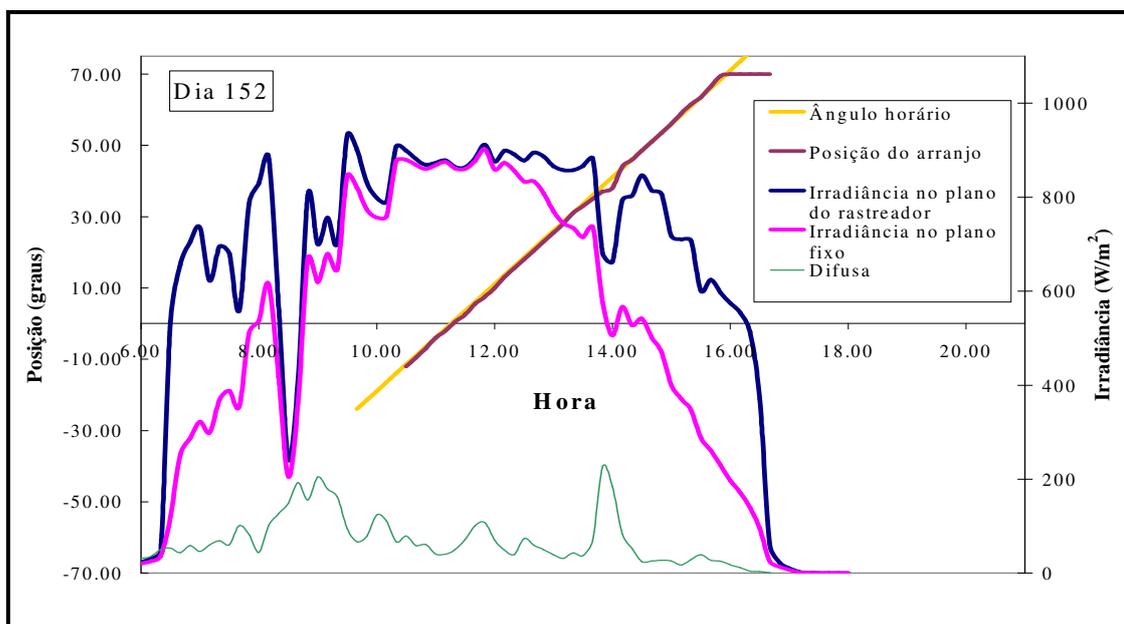


Figura 4.5 – Posições do arranjo e ângulo horário ao longo do dia 01 de Junho.

Durante o período de alta irradiância, observa-se uma sobreposição quase completa entre os valores do ângulo de rastreo medidos experimentalmente e os

calculados. Para estas condições de irradiância solar, o rastreador foi capaz de seguir o Sol com erros de no máximo um grau.

No período de baixa irradiância, o rastreador ficou atrasado em relação ao movimento Leste-Oeste do Sol, chegando a apresentar até três graus de diferença. Esse atraso é consequência da lógica adotada no projeto do sensor de alinhamento, que mantém o rastreador parado para situações de tempo muito nublado. Porém, observa-se no gráfico um realinhamento do rastreador com o Sol imediatamente após cessar a condição de céu nublado.

O comportamento do protótipo para dias nublados fica claro no gráfico da Figura 4.6, onde constantes mudanças no tempo levaram o rastreador a apresentar diversos atrasos durante o período de medições. O maior atraso ocorreu por volta das 14:30h, quando o sistema se atrasou 8,5 graus em relação ao Sol.

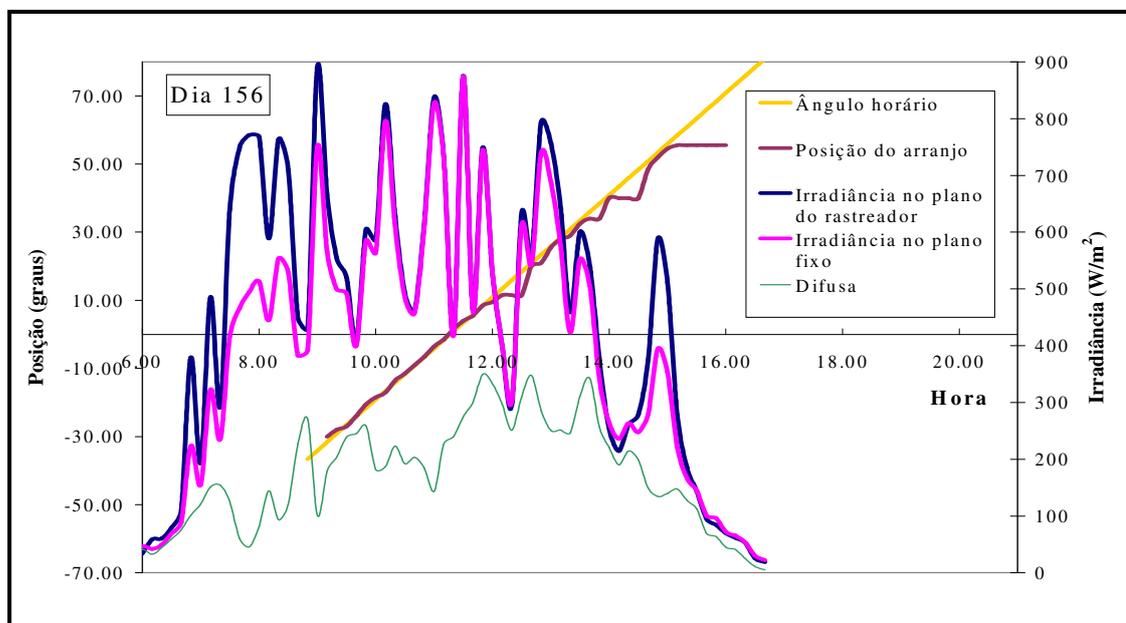


Figura 4.6 – Posições do arranjo e ângulo horário ao longo do dia 05 de Junho.

Também pôde ser observada neste dia uma parada definitiva do sistema de rastreamento antes da sua posição final, isto é, antes da atuação da chave fim de curso. A parada ocorreu por volta das 15:00h, devido à baixa irradiância ocorrida a partir deste horário, com sistema posicionado a 55 graus virado para Oeste. No caso do dia mostrado na Figura 4.5, o sistema alcançou sua posição final de 70 graus para Oeste, definida pela chave fim de curso.

5 CUSTOS DO SISTEMA

O custo do projeto foi levantado com base nos custos dos componentes eletrônicos utilizados na implementação do sistema eletrônico de controle e no material e serviços usados na construção da estrutura mecânica.

A Tabela 5.1 mostra uma lista dos materiais utilizados na construção da estrutura mecânica do rastreador com suas respectivas quantidades e custos atualmente praticados. A caixa de redução de velocidade teve sua confecção encomendada a uma empresa especializada. O item Serviços corresponde ao custo médio da mão-de-obra cobrado por uma empresa especializada para construção da estrutura. O custo total da estrutura mecânica foi de R\$840,00, que corresponde a cerca de US\$382,00 para o câmbio atual (US\$1,00 = R\$2,20).

Tabela 5.1 – Custo dos materiais e serviços utilizados na estrutura mecânica do rastreador.

Qtd.	Descrição	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
1	Vara perfil "L" de ferro (1¼" x ¼")	60,00	60,00
2	Vara perfil "L" de Alumínio (1½" x ⅛")	65,00	130,00
1	Chapa plana de ferro ¼" (30cm x 100cm)	50,00	50,00
2	Rolamento para eixo ⅞"	10,00	20,00
1	Fabricação de caixa de redução com polia	150,00	150,00
1	Chapa plana de Alumínio 1mm (20cm x 40cm)	5,00	5,00
1	Motor CC 12V	70,00	70,00
1	Cabo de aço	1,00	1,00
40	Parafusos	1,00	40,00
1	Tinta preta (fosco)	14,00	14,00
1	Mão-de-obra para montagem	300,00	300,00
		Total	840,00

Na Tabela 5.2 estão listados todos os componentes usados no sistema eletrônico do rastreador, incluindo as chaves fim de curso, com suas respectivas quantidades e custos. Os valores presentes na tabela correspondem aos praticados atualmente no mercado local. O custo do sistema eletrônico totalizou R\$85,50, que corresponde a um custo inferior a US\$39,00.

Tabela 5.2 – Custo dos componentes utilizados no sistema eletrônico de controle.

Qtd.	Descrição	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
1	Circuito integrado regulador de tensão	1,50	1,50
2	Circuito com 4 amplificadores operacionais	1,20	2,40
2	MOSFET de potência canal N	4,05	8,10
2	MOSFET de potência canal P	5,10	10,20
2	LDR	7,50	15,00
1	Retificador controlado a silício	2,50	2,50
1	Circuito integrado com 4 portas 'E'	1,20	1,20
1	Circuito integrado com 6 portas inversoras	1,10	1,10
1	Circuito integrado com 4 portas 'OU'	1,65	1,65
2	Micro-switch	0,60	1,20
2	Chave para fim de curso com 3 terminais	5,00	10,00
2	Diodo	1,60	3,20
1	Potenciômetro	1,50	1,50
15	Resistor 1/8W	0,13	1,95
1	Placa padrão (matriz de pontos)	9,00	9,00
1	Diversos (solda, fusível, dissipador de calor, etc.)	15,00	15,00
		Total	85,50

Um dos maiores fabricantes mundiais de rastreadores solares comercializa um sistema com um eixo de rastreo e capacidade para quatro módulos a um custo de US\$1.250,00. Este valor inclui a estrutura mecânica e o sistema eletrônico de controle.

A empresa oferece ainda a opção de um controle manual para o rastreador por um custo adicional de US\$125,00.

Existe também à venda no mercado um controlador para rastreadores de um eixo produzido por um segundo fabricante ao custo de US\$250,00. Estima-se que o controlador produzido pelo primeiro fabricante citado possua um custo também da ordem de US\$250,00, sendo o restante do custo do seu sistema correspondente à estrutura mecânica e a unidade motora que movimenta o rastreador. Não estão incluídos nesses valores os custos relativos à importação do produto.

O baixo custo do rastreador desenvolvido fica evidente quando comparado aos modelos citados. O sistema eletrônico montado, que disponibiliza controles manuais, custou menos de 20% do valor cobrado por estes modelos, sem controles manuais. O rastreador completo custou US\$421,00 (R\$926,00), o que equivale a menos de 34% do valor cobrado por um dos modelos mais comercializados no mundo.

A maior parte do custo do sistema de rastreamento vem da sua estrutura mecânica. No sistema montado, esta estrutura foi responsável por mais de 90% do custo total do rastreador.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O que pôde ser concluído mediante a observação do funcionamento e realização de medições foi um sistema de rastreamento funcionando de acordo com os critérios adotados na elaboração do projeto.

A estrutura mecânica montada, embora simples, é capaz de permitir um funcionamento adequado do rastreador. Isto mostrou que um sistema de rastreamento dispensa o projeto de estruturas mecânicas complexas e dispendiosas, podendo oferecer bons resultados através de uma montagem simples e harmoniosa com o funcionamento do sistema eletrônico de controle do motor.

O retorno do sistema à posição inicial não apresentou qualquer problema mesmo na ausência de baterias. Implementado de maneira simples e confiável, esta operação se mostrou funcionar adequadamente, mesmo em dias muito nublados, através unicamente da radiação difusa.

O acompanhamento do Sol ocorreu de acordo com o esperado. O sistema segue o Sol ao longo do dia sempre que existir uma presença significativa de radiação direta, e permanece parado quando há uma predominância da radiação difusa. Como foi comentado, as paradas do sistema não provocam perdas significativas na irradiação coletada, o que pôde ser confirmado através das medidas realizadas.

Os ganhos na irradiação diária variaram de acordo com os valores de irradiância registrados. Em dias muito nublados, o ganho em energia do rastreador torna-se baixo, e

em dias com céu limpo, o ganho torna-se máximo. Para os dias em que se realizaram medições, o benefício máximo e mínimo observado foi de 31% e 15%.

Os erros observados no acompanhamento do Sol variaram também de acordo com os níveis de irradiâncias ocorridos. O sistema apresentou erros máximos de um grau para períodos com boa presença da radiação direta. Este erro aumentou à medida que se aumentou a presença da radiação difusa na composição da radiação total que chegou ao plano do rastreador. Para uma presença predominante da radiação difusa, isto é, com céu demasiadamente nublado, o sistema permaneceu parado, realinhando-se ao Sol em seu movimento Leste-Oeste imediatamente após cessar a condição de tempo nublado.

O custo do rastreador montado foi em torno de 66% inferior ao cobrado por um modelo de fábrica com características semelhantes. A estrutura mecânica do sistema foi responsável por mais de 90% do custo total do rastreador, podendo ser trabalhada e ter seu custo ainda mais reduzido.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Embora os objetivos do projeto tenham sido alcançados, algumas melhorias podem ser realizadas, bem como uma análise mais prolongada do funcionamento do sistema. Ficam como sugestões para trabalhos futuros:

- a) Alterar o circuito do sensor de alinhamento para possibilitar ao sistema realizar o acompanhamento do Sol em dois sentidos, que possibilitará a sua utilização em dispositivos que exijam rastreamento em dois eixos;
- b) Implementar o sistema eletrônico de controle usando microprocessador, de forma a eliminar os problemas de rastreamento em situações de céu nublado e obter um rastreador de alta precisão para uso sobretudo em instrumentação;
- c) Realizar melhorias na estrutura mecânica, diminuindo o custo e/ou possibilitando um aumento do número de módulos FV;
- d) Avaliar a utilização do sistema eletrônico de controle em outras estruturas mecânicas, incluindo estruturas de fábrica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELLA, A. M., (2004) **Cavidades tipo V para sistemas fotovoltaicos de baja concentración**. XII congreso Ibérico y VII congreso Íbero Americano de Energia Solar, Vigo, Espanha, Libro de Actas, Vol. 2, pp 965-970.

AL-NAIMA, F. M.; YAGHORIAN, N. A., (1991) **A microprocessor-based control system for a sun tracker**. Renewable Energy, Vol. 1, Nº 2, pp 183-198.

BERMAN, E.; MITCHELL, K. W., (1989) **Photovoltaic power plants: present and future**. Proceedings of the 4th International Science and Engineering Conference, Sidney, NSW Australia. Editado por The institute of Radio and Electronics Engineers of Australia.

BIONE, J.; VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N., (2004) **Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators**. Solar Energy, Vol. 76, pp 703–711.

HESSION, P. J.; BONWICK, W. J., (1984) **Experience with a sun tracker system**. Solar Energy, Vol. 32, Nº 1, pp 3-11.

KARIMOV, KH. S.; SAQIB, M.A.; AKHTER, P.; AHMED, M.M.; CHATTHA, J.A.; YOUSAFZAI S.A., (2005) **A simple photo-voltaic tracking system**. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 87, pp 49-59.

KALOGIROU, S. A., (1996) **Design and construction of a one-axis sun-tracking system**. Solar Energy, Vol. 57, Nº 6, pp 465-469.

LIMA, G. A.; 2006. **Sistema de Dessalinização por Osmose Reversa Acionado por Gerador Fotovoltaico com Conversor de Freqüência**. Dissertação (Mestrado em

Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

LYNCH, W. A.; SALAMEH, Z. M., (1990) **Simple electro-optically controlled dual-axis sun tracker**. Solar Energy, Vol. 45, Nº 2, pp 65-69.

MARTINEZ, F. J. A.; MATAS, A. M.; SÁNCHEZ, J. A., (2003) **Central Toledo PV: La capacidad real de producción de una instalación fotovoltaica de gran escala conectada a red**. Era Solar, Vol. 113.

MCBRIDE, L., (2002) **An explanation how the Unipolar Optoisolated H-bridge works**. www.mbari.org/staff/lance/Optoisolated_H-Bridge.pdf. (acessado em julho de 2005).

MONTEIRO, F. A. M.; VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N., (2005) **Development of a low cost control system for a solar tracker**. ISES 2005 Solar Word Congress, Orlando, Florida, USA, article 1462.

OLIVEIRA, C. A. A.; FRAIDENRAICH, G.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C., (2002) **Desenvolvimento de um software para projeto e traçado de isolinhas de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de eletrificação rural**. XI Congresso Ibérico e VI Ibero Americano de Energia Solar, Portugal.

POULEK, V.; LIBRA, M., (1998) **New solar tracker**. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 51, pp 113-120.

RABL, A., **Active solar collectors and their applications**. Oxford University Press, New York, 1985.

VALERA, P.; ENRILE, J.; OSUNA, R.; ABELLA, A. M.; SOLÚCAR, C. F., (2004) **Sevilla PV 1,2 MW – Central fotovoltaica de conexión a red con doble**

concentración y seguimiento solar en dos ejes. XII congreso Ibérico y VII congreso Íbero Americano de Energía Solar, Vigo, Espanha, Libro de Actas, Vol. 2, pp 979-984.

VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C., (2003) **Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. Experiments and simulation.** Solar Energy, Vol. 74, pp 45-52.

VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N., (2001) **A methodology for the design of photovoltaic water supply systems.** Progress in Photovoltaics, Vol. 9, N° 5, pp 349–361.

ZOGBI, R.; LAPLAZE, D., (1984) **Design and construction of a sun tracker.** Solar Energy, Vol. 33, N° 3-4, pp 369-372.