

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA UM RASTREADOR SOLAR DE ALTA PRECISÃO

Antônio Carlos Fernandes de Negreiros – antonio.negreiros@ufpe.br
Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br
Elielza Moura de Souza Barbosa – elielzamsb@gmail.com
Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear
Grupo de Fontes Alternativas de Energia

Resumo. A utilização de sistemas solares com concentração com a finalidade de ampliar a quantidade de energia incidente em uma superfície absorvedora, tanto em uma conversão fotovoltaica ou térmica, requer o emprego de rastreadores. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para operar um rastreador solar de dois eixos com desvios menores que $0,1^\circ$. O sistema controle utiliza um algoritmo de alta precisão para computar a localização do Sol, caso a superfície absorvedora esteja desalinhada em relação à posição solar, o controle do equipamento atua na movimentação da estrutura mecânica do rastreador para realizar o alinhamento. Na medição do posicionamento da estrutura mecânica são utilizados dois encoders instalados nos eixos das posições zenital e azimutal. O sistema de controle foi desenvolvido com um controlador lógico programável (CLP) que em conjunto com um sistema supervisor são responsáveis por toda a parte lógica do controle do equipamento. Foram realizados vários ensaios para avaliar o desempenho do rastreo. Em todos os experimentos os resultados foram satisfatórios. Para a aquisição dos dados, foi desenvolvido um banco de dados que atua em conjunto com o sistema supervisor. Na medição dos desvios angulares entre a estrutura do rastreador e os raios do Sol foi desenvolvido um sensor de apontamento, que tem o objetivo que detectar a condição de desalinhamento. O resultado encontrado com o sensor desenvolvido mostrou que o sistema de controle manteve o rastreador com desvio inferior ao estipulado ($0,1^\circ$) durante a maior parte do tempo (91,25% das medições) em que foi analisado. O sistema de controle desenvolvido utilizou apenas tecnologia nacional no seu desenvolvimento.

Palavras-chave: Rastreamento solar, sistema de controle, rastreador de alta precisão

1. INTRODUÇÃO

Com o contínuo desenvolvimento tecnológico e o apelo pela utilização das fontes renováveis de energia, grandes centrais solares de geração heliotérmica, além de sistemas fotovoltaicos com concentração têm sido propostos como alternativas para a produção de energia elétrica. A difusão desses sistemas de geração imprime a necessidade do conhecimento e desenvolvimento de sistemas de rastreamento solar de alta precisão, tanto para fins de instalação e operação quanto para a manutenção desses dispositivos.

No Brasil, leis e decretos que afetam direta e indiretamente o desenvolvimento da energia solar estão incentivando o surgimento de diferentes propostas de projetos que visam utilizar sistemas com concentração tanto térmicos quanto fotovoltaicos para a geração de eletricidade. Este suporte político tem uma grande importância no desenvolvimento da energia solar e vem acelerando o desenvolvimento das pesquisas nesta área.

Um exemplo importante de iniciativa política de incentivo à energia solar foi a Chamada N° 013 / 2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Chamada 13 (ANEEL, 2011) abriu a possibilidade para que as Companhias de energia destinassem recursos de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) para a instalação de centrais fotovoltaicas de geração. O programa estratégico visa facilitar a inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, buscando a criação de condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica para o estabelecimento da tecnologia no país. Outra iniciativa de impacto para a viabilização da difusão de sistemas fotovoltaicos no Brasil foi a Resolução Normativa ANEEL n° 482 (ANEEL, 2012) que trata da regulamentação da geração distribuída de energia. A norma estabelece um sistema de compensação de energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local.

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada com tecnologia nacional para operar um rastreador solar com a precisão na ordem de décimos de graus (menor que $0,1^\circ$ ou $1,75$ mrad). Visando a sua utilização em centrais solares, com intuito de guiar concentradores térmicos ou fotovoltaicos de alta concentração em relação ao Sol.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Técnicas de Rastreamento

Na literatura, existem inúmeras pesquisas que abordam rastreamento solar. Estes sistemas podem ser aplicados sem concentração, com baixa e média concentração (Poulek e Libra (1998), Monteiro (2007), Oliveira (2007),

Mavromatakis e Franghiadakis (2008)) como também com alta concentração (Roth et al. (2004), Rubio et al (2007), Feuermann et al. (2002), Naidoo et al. (2003), Pedrosa Filho et. al (2010)).

Segundo Gallagher (2008), sistemas que utilizam baixa concentração (1,1 até 2 sóis) podem concentrar radiação solar utilizando apenas um coletor estacionário. Já para sistemas com médio fator de concentração (3 até 10 sóis) é preciso um ajuste diário da superfície coletora em relação ao Sol. Enquanto que em sistemas com alta concentração (acima de 10 sóis), o fator essencial passa a ser a precisão no rastreamento do Sol, o que evidencia a dependência de um controle mais aprimorado.

Para sistemas sem concentração ou de baixa e média concentração o controle do rastreamento é realizado na grande maioria das vezes através de um sensor de alinhamento que comanda a atuação dos motores dos eixos do rastreador. Tais estruturas são dotadas de uma eletrônica bastante simples, que conduzem os atuadores a alinhar o rastreador com o Sol.

Para o acionamento de sistemas que utilizam alta concentração, normalmente os rastreadores utilizam sistemas microprocessados, que comandam servomecanismos dotados de motores de corrente contínua ou de passo para promover a movimentação angular da superfície absorvedora tanto no eixo norte-sul, quanto no leste-oeste, de forma que este fique alinhado com o Sol. O rastreamento é baseado em um conjunto de equações que fornecem o posicionamento do Sol em cada instante.

Um exemplo deste tipo de estratégia foi o rastreador solar desenvolvido por Roth et al. (2004), que tem o objetivo de orientar um sistema de medição de radiação solar direta (Pireliômetro). O equipamento foi projetado para realizar o rastreamento em dois eixos, por meio de motores de corrente contínua. O controle do sistema é baseado em fotodetectores que são organizados em forma de um quadrante. De acordo com a posição do Sol os raios luminosos mudam de direção dentro do quadrante, fazendo com que o controle atue sobre os atuadores (motores) para que o sistema fique alinhado. A precisão do rastreador solar não foi informada pelos autores. No entanto, como o mecanismo foi utilizado na medição da radiação solar direta, que é um processo que depende diretamente do erro de rastreamento (Melo, 1994), é de se esperar que a concepção do equipamento possa ser utilizada em um sistema com alta concentração.

Pedrosa Filho et. al (2010) realizaram a análise dos erros de alinhamento de rastreadores solares com o objetivo de avaliar como esses erros afetam o valor final da concentração obtida. Os resultados mostraram que para sistemas que requerem alta concentração é fundamental o controle dos erros de rastreamento em limites definidos de forma a não afetar, de forma considerável, a concentração final do equipamento.

2.2 Algoritmos de posicionamento do Sol

O cálculo da posição do Sol em relação ao rastreador é o primeiro passo para definição do posicionamento do equipamento ao longo do dia. Os conceitos da geometria solar, como o ângulo de azimute, zênite solar, e outros parâmetros como a equação do tempo são apresentados na literatura. Equações que fornecem o cálculo de tais parâmetros descrevem as variações dos mesmos diurnamente e sazonalmente, de acordo com os movimentos de rotação e translação da Terra ao longo do dia e do ano (Rabl, 1985). No entanto, quando se consideram sistemas de alta concentração, são necessários modelos com uma maior precisão. Para isso, são utilizados algoritmos que calculam a posição solar baseados em dados e equações astronômicas.

Na literatura solar existem vários trabalhos que abordam algoritmos de alta precisão para cálculo da posição do Sol. Spencer (1971) apresentou um algoritmo para cálculo da declinação solar e equação do tempo através de Series de Fourier. Walraven (1978) demonstrou um dos primeiros algoritmos para cálculo da posição solar na superfície terrestre. Este algoritmo foi baseado em fórmulas derivadas do *The American Ephemeris and Nautical Almanac* (1977). Wilkinson (1981) apresentou um algoritmo implementado em FORTRAN para cálculo da posição do Sol. Michalsky (1988) consultou as fórmulas do *The Astronomical Almanac* (1986) para a realização do seu trabalho. O resultado foi um algoritmo que calcula a posição do Sol com uma precisão de $0,01^\circ$ no período de tempo entre 1950 e 2050.

Wilkinson (1983) publicou um artigo que aborda a influência da refração atmosférica no azimute solar. Na mesma linha de pesquisa Kambezidis e Papanikolaou (1990) abordaram em seu trabalho um estudo do efeito da refração atmosférica na posição solar.

Blanco-Muriel et al. (2001) desenvolveram um algoritmo que calcula a posição real do Sol com uma precisão de 0,5 minutos de arco para um período de vigência de 1999 até 2015. O algoritmo permite o uso de sistemas microprocessados de menor capacidade de processamento para o cálculo do azimute e zênite solar. Este algoritmo foi desenvolvido pelos pesquisadores da Plataforma Solar de Almería e foi nomeado como PSA.

Reda e Andréas (2004) desenvolveram um algoritmo que calcula a posição do Sol em um período de 2000 a.C. até 6000 d.C. com uma incerteza máxima de $0,0003^\circ$. O Algoritmo adota a Teoria das Órbitas Planetárias das Variações Seculares que foi desenvolvido por Bretagnon (1982). Devido à larga faixa de validade, o algoritmo, desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) nomeado de Solar Position Algorithm (SPA) requer uma grande quantidade de cálculos.

De acordo Grena (2007), na literatura de sistemas solares são encontrados vários algoritmos que computam a localização do Sol na superfície da Terra. Existem algoritmos com baixo poder computacional com precisão de aproximadamente $0,01^\circ$, mas também existem com alto poder de cálculo com precisão em torno de $0,0003^\circ$. No seu trabalho, ele desenvolveu um algoritmo com uma precisão intermediária, onde a complexidade computacional foi um

pouco aumentada em relação aos algoritmos menos precisos. No entanto, a precisão alcançada foi de $0,0027^\circ$, com um período de vigência que está entre os anos de 2003 e 2023, suficiente para a grande maioria das necessidades.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como já citado anteriormente, o rastreador desenvolvido emprega o controle em malha fechada para o seguimento do Sol. A seguir é descrita a metodologia que foi utilizada para o desenvolvimento do sistema de controle do rastreador, com o detalhamento das características empregadas em seu processo de criação.

3.1. Estudos comparativos entre os algoritmos de alta precisão - Escolha do algoritmo

A obtenção da posição do Sol é o primeiro passo para o desenvolvimento do sistema de controle proposto. A posição solar varia a cada instante e depende de equações que estimam diferentes parâmetros determinados pela geometria Sol -Terra. Os modelos normalmente utilizados nos cálculos da posição solar (Rabl, 1985; Duffie e Beckman, 1991) são baseados em equações simplificadas, que para fins de projetos de sistemas planos e sem concentração, são perfeitamente válidos. No entanto, como o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de controle de um rastreador para aplicações que requerem alta relação de concentração, é necessário trabalhar com modelos mais precisos.

O emprego de um algoritmo de alta precisão surge como alternativa. No entanto, a sua escolha depende de fatores que influenciam diretamente no projeto em questão. Primeiramente, antes de fazer uma comparação entre os algoritmos de posicionamento do sol, foi preciso realizar uma análise dos principais estudos existentes na literatura. Existem inúmeros algoritmos referentes à área, porém os mais apropriados para esta pesquisa são os apresentados por Grena (2007), Blanco-Muriel et al. (2001) e Reda e Andréas (2004).

Para a validação do modelo que melhor se adéqua à situação do projeto, foram consideradas três características presentes em cada algoritmo que serviram como critérios de escolha.

1. Números de cálculos realizados – Quantidade de operações matemáticas efetuadas pelo algoritmo;
2. Precisão – Qualidade de calcular a posição solar apresentando um erro mínimo.
3. Tempo de validade – Período de tempo que o algoritmo pode ser aplicado.

Dentro dos aspectos considerados acima, o algoritmo que melhor se adéqua foi o desenvolvido por Grena (2007), visto que ele contempla os três pontos fundamentais. Este algoritmo foi adotado no projeto. Já o desenvolvido por Blanco-Muriel et al. (2001) foi descartado devido ao fato de seu período de vigência (critério 3) está próximo do seu término.

3.2. Sistema de controle e suas características

Com a obtenção da posição solar por meio do algoritmo de alta precisão (Grena, 2007), o controle deverá atuar no posicionamento do equipamento de forma a manter o rastreador alinhado com o Sol com uma precisão de $\pm 0,1^\circ$. Esta operação utiliza um método específico que emprega uma sequência de instruções bem definidas para orientar o rastreador no posicionamento da superfície absorvedora em relação ao Sol.

O diagrama do processo (Fig. 01) é composto por cinco blocos estruturais. O primeiro bloco é o de obtenção da posição do Sol. Este bloco possui o objetivo de calcular a posição do Sol ao longo do dia, disponibilizando-a para o bloco do controle do sistema. O bloco (1) será composto pelo algoritmo de rastreamento do Sol de alta precisão desenvolvido por Grena (2007).

No segundo bloco estrutural (2), encontra-se o controle central do equipamento, responsável por todas as tarefas executadas pelo sistema. Este controle é realizado por um Controlador Lógico Programável (CLP) e por um sistema supervisão presente em um computador.

O bloco seguinte (3) é composto pela parte estrutural do equipamento, que é formada pela estrutura mecânica que compõe o rastreador, como os atuadores dos eixos, reduções mecânicas e a estrutura física.

Para finalizar, existe o sensor de posicionamento (bloco 4), que indica a posição real em que a estrutura física encontra-se nos dois eixos (azimute e zênite). Este bloco é composto por dois *encoders* incrementais que medirão os ângulos da posição de azimute e zênite do rastreador. Os *encoders* utilizados têm uma precisão de 20000 pulsos por revolução, o que possibilita uma precisão teórica máxima de rastreio de $0,018^\circ$ graus/pulso.

O erro absoluto gerado entre a posição real do rastreador e a posição fornecida pelo algoritmo de posição do Sol é verificado pelo controle do equipamento que atuará, quando necessário, no sentido de minimizá-los. A redução do erro será realizada através de pulsos de tensão que serão produzidos pelo sistema de controle para atuar os motores dos eixos da posição do zênite e do azimute. Este ajuste é executado de forma que o erro não apresente um valor superior ao estabelecido ($0,1^\circ$ ou $1,75$ mrad).

O último bloco (5), resposta do sistema, tem a função de indicar para o controle do equipamento (2) se a saída do sistema (posição real da estrutura mecânica do rastreador) encontra-se na condição de alinhamento ou desalinhamento em relação à posição desejada (localização do Sol). Para isto, foi desenvolvido um sensor de apontamento que distingue se existe desvio do rastreador em relação aos raios solares. Este sensor detecta as condições de desvios indicando se o equipamento está na condição de alinhado ou não.

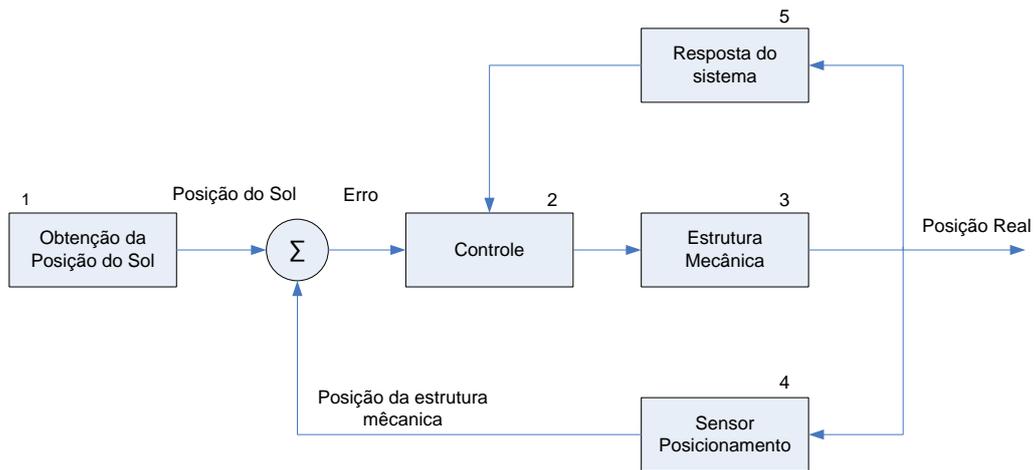


Figura 01 – Diagrama de controle do processo.

Para um melhor desenvolvimento da estratégia adotada, foram definidas quatro maneiras diferentes para operação do sistema de controle. Estes modos de operação descrevem o funcionamento do equipamento, servindo para esquematizar o processo, de modo a facilitar e ordenar o desenvolvimento do controle geral. Para mais informações sobre o sistema de controle consultar Negreiros (2013).

- I. **Modo de Calibração:** Utilizado para realizar todas as configurações e parametrizações necessárias. Este modo de operação tem como principal finalidade realizar a aferição dos sensores de posicionamento (eixo da posição do zênite e azimute) em relação ao valor de saída do algoritmo de rastreamento solar (posição do Sol).
- II. **Modo Manual:** Permite o posicionamento manual do equipamento. Esta maneira de operar possibilita a movimentação dos eixos do equipamento por meio de botões. Este modo de operar é significativamente importante, pois será possível guiar o painel do rastreador para uma posição qualquer.
- III. **Modo de Repouso:** Configuração necessária para o repouso do sistema. Neste modo de operação, o equipamento será colocado na posição de origem, de modo a manter a configuração mais estável para uma nova inicialização.
- IV. **Modo de Rastreamento:** O rastreamento é realizado por intermédio do algoritmo de posicionamento. No procedimento de rastreamento, o cálculo da posição solar é realizado por meio do algoritmo. Em seguida é realizada uma leitura dos sensores de posicionamento dos eixos da elevação e azimute (posição real do equipamento). Caso o erro entre a posição do Sol e a posição do equipamento supere o valor estipulado o ajuste é realizado. É importante destacar que o desvio é calculado individualmente para cada eixo, assim como o ajuste.

4.0 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validação do sistema de controle desenvolvido, foram realizados experimentos para avaliar a precisão e analisar o comportamento do rastreamento ao longo do dia. Nas seções a seguir são mostrados os resultados obtidos destes experimentos.

4.1 Comportamento do rastreamento realizado pelo sistema de controle ao longo das horas de Sol

Este ensaio foi realizado nas horas que o sistema de controle consegue efetivamente realizar o acompanhamento do Sol. Para que o controle consiga efetuar o acompanhamento do Sol com desvios inferiores ao estabelecido ($0,1^\circ$ ou $1,75$ mrad), é preciso que o ajuste do rastreador seja efetuado com um erro menor do que o este desvio proposto.

O mínimo desvio que pode ser mensurado pelo sistema de controle é o valor da precisão do *encoder* ($0,018^\circ$). Desta forma, o valor máximo de precisão seria o valor de medição do *encoder* ($0,018^\circ$ graus/pulso), no entanto, foi visto no experimento que no eixo do zênite que o motor não consegue gerar micro passos desta ordem. Já no eixo do azimute, como utiliza uma caixa de redução para a diminuição da velocidade, a precisão de $0,018^\circ$ foi utilizada sem problemas. Diante disto, a faixa de erro estabelecido para os eixos de azimute e zênite foram respectivamente $-0,018^\circ < \epsilon_{\text{azimute}} < 0,018^\circ$ e $0,03 < \epsilon_{\text{ângulo zenital}} < 0,03^\circ$. Este intervalo dos erros foram utilizados durante todos os outros ensaios.

Os resultados do comportamento do sistema de controle para os dias em análise foram similares. A Tab. 01 mostra uma comparação entre os valores percentuais dos erros dos dias 21, 22 e 28. No dia 21, 98,51% das medições indicaram que o rastreador estava alinhado no eixo da posição zenital. Enquanto que no azimute este percentual foi de 88,55%. Já

no dia 22, o resultado foi de 96,16% e 80,65% para os eixos das posições do ângulo zenital e azimutal respectivamente. Se for feita uma comparação com o dia 28 o resultado fica bem próximo aos dois dias da análise.

Tabela 01: Valores percentuais do erro absoluto que dispersaram do intervalo estipulado.

Dia	Erro Zênite	Erro Azimute
21-10-2013	1,49%	11,45%
22-10-2013	3,84%	19,35%
28-10-2013	2,30%	9,2%

O sistema de controle junto com a estrutura mecânica consegue operar no rastreamento com erros desta magnitude. Lembrando que o intervalo de erro adotado para o sistema de controle realizar o ajuste ($-0,018^\circ < \epsilon_{\text{azimute}} < 0,018^\circ$; $-0,03^\circ < \epsilon_{\text{ângulo zenital}} < 0,03^\circ$) é muito menor que o erro aceitável no rastreamento ($0,1^\circ$). Esta característica garante que no perfeito funcionamento do sistema de controle, o acompanhamento do Sol vai ser realizado com erro inferior a $0,1^\circ$.

A Fig. 02, mostra o comportamento dos erros dos dois eixos para o dia 28-10-2013. Nestes gráficos é possível verificar o comportamento do desvio na atuação do sistema de controle.

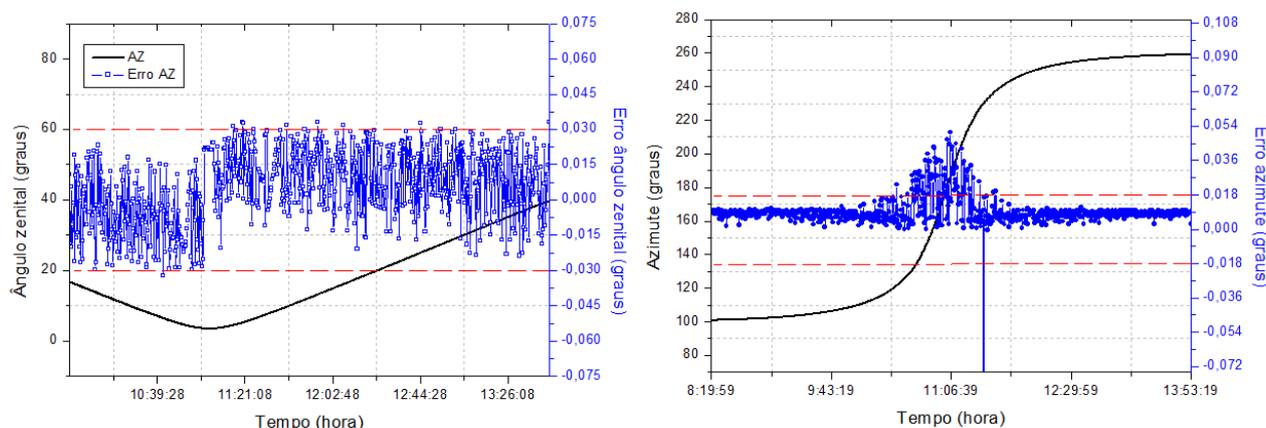


Figura 02 – Comportamento do ângulo zenital (AZ) e erro absoluto correspondente (à esquerda) e comportamento do ângulo azimutal e erro absoluto correspondente (à direita) para o dia 28-10-2013.

4.2 Comportamento do rastreamento ao longo do dia

O comportamento do sistema de controle ao longo do dia inteiro segue um padrão que é repetido durante todos os dias do ano. A Fig. 03 apresenta a ação do controle em todos os momentos do dia para o eixo de azimute e zênite respectivamente. Estes gráficos foram resultados das medições do dia 28 de outubro de 2013.

No período da noite ou madrugada o rastreador permanece parado em uma posição de repouso (azimute = 90° ; AZ = 0°). Esta posição já o deixa preparado para o nascer do Sol no dia posterior. É importante salientar que o sistema de controle não toma nenhuma ação enquanto que o valor do AZ for maior que 90° . Neste período a estrutura mecânica encontra-se desalinhada em relação ao Sol e o erro é significativo (figura 03). A partir do instante em que o AZ do Sol torna-se menor que 90° , o controle inicia a operação de rastreamento.

No eixo do azimute, o controle faz o rastreio normalmente e o erro logo torna-se dentro da faixa aceitável. No entanto, no eixo da posição do AZ, o rastreador só inicia o rastreamento efetivamente a partir do momento em que o valor do AZ for inferior a 74° (abertura angular máxima da estrutura mecânica no eixo do zênite). A partir desse instante, o controle logo mantém a estrutura mecânica do rastreador alinhada com o Sol. Este comportamento é mantido ao longo do intervalo de tempo em que o valor do AZ do Sol for inferior a 74° . Neste período os erros tornam-se aceitáveis para os dois eixos.

Ao final do dia, o Sol novamente fica com o AZ superior a 74° , momento em que o erro no eixo vai aumentando até o instante em que o Sol se põe (zênite $> 90^\circ$). Neste ponto o sistema de controle inicia a operação para colocar a estrutura mecânica do rastreador na posição de repouso. A posição de repouso é mantida até o dia posterior, onde se inicia o processo novamente.

Diante do demonstrado, é possível concluir que o sistema de controle mostrou ser capaz de manter o rastreio do Sol dentro do erro aceitável ao longo do dia. Nos momentos do nascer do Sol, por do Sol e no período da noite o comportamento foi de acordo com o esperado.

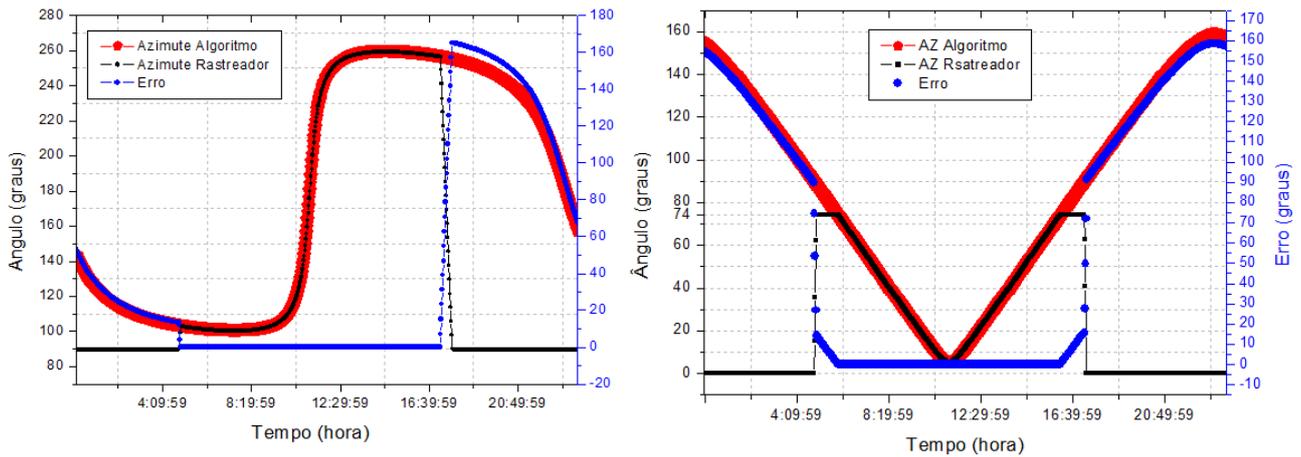


Figura 03 – Comportamento do ângulo de azimute do sol, do rastreador e do erro do sistema de controle (à esquerda) e comportamento do ângulo do zenital do sol, do rastreador e do erro do sistema de controle (à direita) para o dia 28-10-2013.

4.3 Utilização do sensor de apontamento para a avaliação da precisão do rastreamento

Para a verificação das condições de alinhamento e desalinhamento entre os raios solares e a normal do coletor do rastreador foi desenvolvido um sensor de apontamento. Este dispositivo possui a finalidade de verificar a ocorrência dos desvios dentro de um erro estabelecido e indicar ao sistema de controle se o rastreador encontra-se alinhado ou desalinhado durante o processo de rastreamento.

O sensor é um tubo metálico enegrecido onde em uma das extremidades (tampa superior) tem um pequeno orifício em forma de circunferência. Por este furo irão adentrar os raios solares para dentro do tubo. A uma distância específica do furo tem uma lente que tem o objetivo de gerar a imagem dos raios solares incidentes no fundo do tubo. A formação da imagem no fundo do tubo ocorre sempre a uma distância fixa da lente, o que mantém um tamanho fixo da imagem. Na base do tubo encontram-se dois transdutores sensíveis à luz solar. Os transdutores são dois Resistores Dependentes de Luz (LDR). A Fig. 04 é possível verificar o leiaute da estrutura descrita. Os LDR's no fundo do tubo estão localizados de forma que, o LDR 1 esteja alinhado com o furo da tampa superior. O objetivo deste transdutor é realizar a verificação da imagem sobre o mesmo na condição de alinhamento. Já o LDR 2 é utilizado como referência da radiação interna do tubo. Para maiores informações sobre o sensor de apontamento consultar Negreiros (2013).

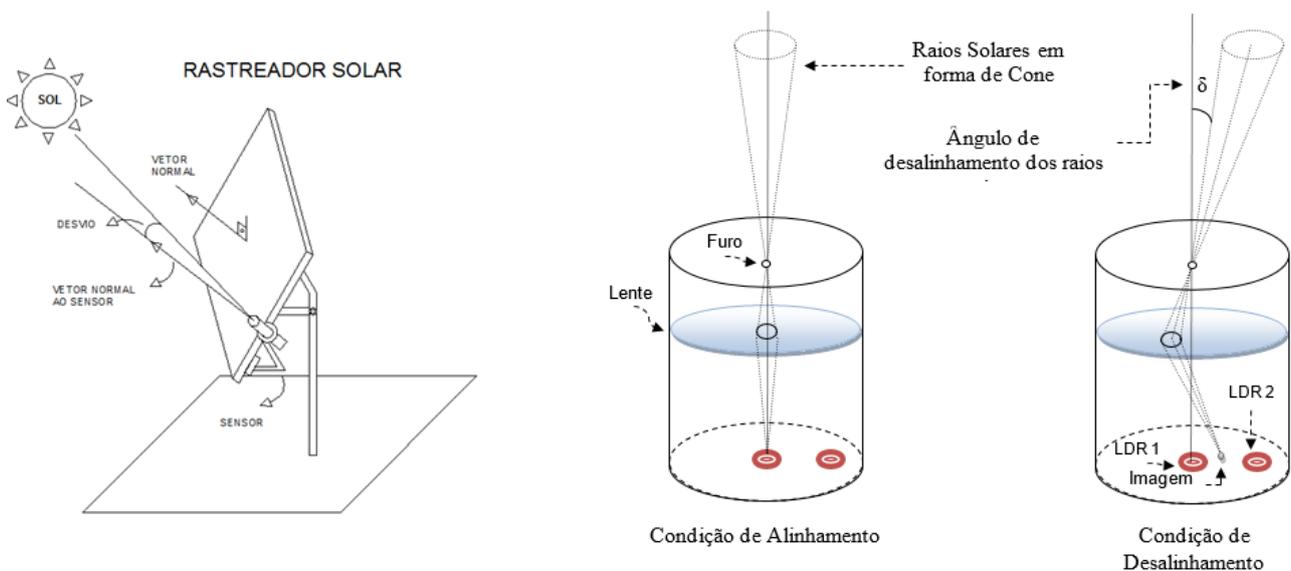


Figura 04 – À esquerda: sensor de apontamento. À direita: Diagrama funcional do sensor de apontamento.

O tamanho da imagem no fundo do tubo depende do diâmetro do furo da tampa. Assim variando esta grandeza é possível aumentar ou diminuir a precisão do desalinhamento que o sensor pode detectar. Os desvios que o sensor de apontamento desenvolvido pode detectar são a partir dos valores $0,114^\circ$, $0,458^\circ$ e $1,287^\circ$. Para erros entre a estrutura mecânica e os raios do Sol maiores que estes valores, o sensor indica o desalinhamento. Foram realizados vários dias de ensaios para a avaliação da precisão do rastreamento do rastreador em relação ao Sol. Os ensaios foram realizados nos

dias de céu claro, pois a passagem de nuvem influencia diretamente no funcionamento do sensor. Os resultados mostrados a seguir foram provenientes das medições realizadas no dia 29 de outubro.

Foi realizada uma análise de frequência para as medições do sensor de apontamento mostrando que o sistema de controle manteve o rastreador alinhado durante 91,26% das medições para desalinhamentos menores que $0,114^\circ$. Para precisão de $0,458^\circ$ o percentual foi de 99,81%. Já para precisão de $1,287^\circ$ o percentual foi de 100%.

No geral, os resultados mostraram que sistema de controle manteve o rastreador alinhado em relação ao Sol durante a maior parte do tempo para os três desvios analisados. O que comprova que o controle desenvolvido consegue operar o rastreador com erros abaixo do desvio estipulado ($0,1^\circ$ ou $1,75$ mrad).

5. CONCLUSÕES

O sistema de controle desenvolvido mostrou ser capaz de manter o rastreo do Sol dentro da tolerância estabelecida ($0,1^\circ$) na maior parte das medições, mostrando o seu potencial para a utilização em sistemas com concentração. Os ensaios com o sensor de apontamento mostraram que o controle manteve o rastreador alinhado com erro menor que $0,114^\circ$ durante 91,26% das medições realizadas.

Vários ensaios relativos ao comportamento do rastreamento realizado pelo sistema de controle foram efetuados. Os resultados mostraram que a atuação do controle foi de acordo com o esperado. O comportamento ao longo do dia mostrou que o rastreamento foi realizado dentro do intervalo de erro estipulado ($-0,018^\circ < \epsilon_{\text{azimute}} < 0,018^\circ$; $-0,03^\circ < \epsilon_{\text{ângulo zenital}} < 0,03^\circ$). Apresentando erros absolutos médios entre a posição do rastreador e do Sol de $0,013^\circ$ e $0,009^\circ$ para os eixos ângulo zenital e azimutal respectivamente. O sistema de controle desenvolvido utilizou apenas tecnologia nacional no seu desenvolvimento, o que permite o progresso, a dependência e integridade desta tecnologia no país. Diminuindo gastos com montagem, manutenção da importação.

REFERÊNCIAS

- Blanco-Muriel, M., Alarcon-Padilla, D.C., Lopea-Moratalla, T., Lara-Coira, M. Computing the solar vector. *Solar Energy* 70 (5), 431–441, 2001.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 2ª ed. New York: Wiley-Interscience, 1991.
- Feuermann, Daniel; Gordon, Jeffrey M.; Huleihil, Mahmoud, *Solar fiber-optics mini-dish concentrators: first experimental results and field experience*. *Solar Energy, Israel*, v. 72, n. 6, 2002.
- Grena, Roberto. Na algorithm for the computation of the position. *Solar Energy* 82, 462 – 470.
- Gallagher, J. J. *Nonimaging optics in solar energy*. Morgan & Claypool, 2008.
- Kambezidis, H. D., Papanikolaou, N. S. Solar Position and Atmospheric Refraction, *Solar Energy* 44, 143-144 (1990).
- Mavromatakis, F., Franghiadakis, Y., 2008. A highly efficient novel azimuthal heliotrope. *Solar Energy*, Vol.82, PP.336-442.
- Melo, J.M.D. Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta. Tese apresentada na Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP, 1994.
- Michalsky J. J. (1988). The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy* 40(3), 227–235.
- Monteiro, Flávio A. M.; Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar. 2007. (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- Naidoo, P., Brooks, M.J. e Van Niekerk, T.I. Intelligent control and tracking of a solar parabolic trough. In: *African Control Congress*, 1., 2003, África do Sul, Annals, Cidade do Cabo: Universidade da Cidade do Cabo, 2003.
- Negreiros, A. C. F. Desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para um rastreador solar. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares (PROTEN), 2013.
- Oliveira, Carlos A. A.; Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. 2007 (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- Pedrosa Filho, M. H. O., Vilela, O. C., Fraidenraich, N. Avaliação da influencia dos desvios óticos e de rastreamento na concentração de um coletor parabólico linear. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 14, 2010.
- Pedrosa Filho, M. H. O. Simulação e análise de sistemas de alta concentração de radiação solar. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares (PROTEN), 2010.
- Pitman, C. L.; Vant-Hull, L. L., Errors in locating the sun and their effect on solar intensity predictions. Meeting of American Section of the International Solar Energy Society, Denver, p 701-706, 1978.
- Poulek, V.; Libra, M. New Solar Rastreador. *Solar Energy Materials and Solar Cells* Vol. 51: 113- 120, 1998.
- Poulek, V.; Libra, M. A very simple solar rastreador for space and terrestrial applications. *Solar Energy Materials & Solar Cells* Vol.60: 99-103, 2000.
- Rabl, A. *Active solar collectors and their applications*. New York: Oxford University Press, 1985.
- Reda, I., Andrea, S. A., 2004. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy* 76 (5), 577–589.

- SPencer, J.W. Fourier series representation of the position of the sun. Search 2, 172 (1971).
Walraven, R. Calculating the position of the Sun. Solar Energy 20, 393-397 (1978).
Wilkinson, B. J. An improved FORTRAN program for the rapid calculation of the solar position, Solar Energy 27, 67 (1981).
Wilkinson, B. J. The effect of atmospheric refraction on the solar azimuth, Solar Energy 30, 295 (1983).

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR AN OPEN LOOP SOLAR TRACKER

Abstract. The use of solar concentration systems in order to increase the amount of energy incident on a surface absorber, both in a photovoltaic or thermal conversion, requires the use of tracers. This paper presents the development of a system of closed loop control to operate a solar rastreador with deviations smaller than $0,1^\circ$. The control system utilizes an algorithm to compute high-precision location of the sun, where the absorbing surface is offset in relation to the sun position, the control device operates the drive of the mechanical structure of the crawler to perform the alignment. For measuring the position of the mechanical structure, two axes of encoders installed at the zenith and azimuth positions were used. The control system was developed with a programmable logic controller in conjunction with a supervisory system are responsible for all the logic of the control equipment. Several tests were conducted to evaluate the performance of screening. In all tests the result was satisfactory. For data acquisition, we developed a database that works in conjunction with the supervisor. The measurement of angular deviation between the structure of the tracker and the rays of the sun sensor pointing, which aims to detect the misalignment condition was developed. The results found with the sensor showed that the developed control system to the crawler kept below the set deviation (0.1°) during most of the time (91.25 % of the measurements) which was analyzed. The control system developed using only national technology in its development, with an estimated initial cost quite favorable.

Keywords: Solar tracking, control system, high precision tracker.