

IMPACTOS DO DESALINHAMENTO DOS SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR EM SISTEMAS COM ALTA CONCENTRAÇÃO: ESTUDO DE CASO – SISTEMA HCPV DEN-FAE-UFPE

Antônio Carlos Fernandes de Negreiros – antonio.negreiros@ufpe.br

Francisco José Buelvas Uribe – francisco.buelvas@gmail.com

Douglas Ramos Velozo – dougvelozo@gmail.com

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. O trabalho apresenta a análise do impacto da geração de energia causada pelo desalinhamento entre a estrutura física do rastreador e os raios solares. Foi utilizado como objeto de estudo o sistema Fotovoltaico de Alta Concentração (HCPV – High Concentrator Photovoltaics) instalado pelo Grupo em Fontes Alternativas de Energia (FAE) no Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Através das medições realizadas foi possível quantificar o decaimento da geração de potência na saída do sistema em função do incremento no ângulo de desvio entre o vector normal ao plano do gerador e os raios solares. O presente documento apresenta as principais características do sistema HCPV utilizado, a metodologia implementada e uma descrição de um sensor de apontamento que foi desenvolvido a realização dos experimentos.

Palavras-chave: Sistemas HCPV, Rastreamento solar, Avaliação de alinhamento.

1. INTRODUÇÃO

A alternativa de utilização dos Sistemas Fotovoltaicos com Alta Concentração (HCPV – High Concentrator Photovoltaics), fornece uma alternativa às tecnologias fotovoltaicas convencionais com uma abordagem que visa produzir energia elétrica com menores custos. O incremento da eficiência no processo de converter a radiação solar em energia elétrica é um dos fatores chave no suprimento da crescente demanda energética mundial (Gombert et al. 2010). Os sistemas HCPV têm o potencial de reduzir os custos na geração de energia devido a que possuem uma maior eficiência através da operação conjunta de sistemas ópticos de concentração e, na maioria dos casos, de células Multi-Junção (M-J) de alta eficiência e menor tamanho (García-Domingo et al. 2014; Hontoria et al. 2012; Gombert et al. 2010; Luque e Andreev 2007).

Entre os sistemas fotovoltaicos com concentração, aqueles que têm demonstrado os maiores índices de eficiência utilizam níveis de concentração superiores a 250 sóis. O maior nível de eficiência reportada até o momento nos módulos HCPV encontra-se na ordem de 38,90% para níveis de concentração acima de 500 sóis (Soitec, 2015). Dependendo da quantidade de vezes que a radiação solar é concentrada sobre a superfície da célula, um dos fatores essenciais que afetam a eficiência de sistemas com alta concentração é a precisão no rastreamento do Sol (O’Gallagher 2008). A concentração final obtida na prática pode se distanciar dos modelos teóricos. A redução da concentração pode ser atribuída a diferentes efeitos tais como, imperfeições dos materiais utilizados (superfícies refletoras ou refratoras), erros de posicionamento do sistema de rastreamento, alinhamento dos componentes ópticos e os efeitos físicos relativos ao trajeto da radiação solar na atmosfera (Pedrosa Filho et al. 2010). Estes desvios podem resultar em uma redução de concentração e deslocamento parcial ou total da imagem com relação ao absorvedor provocando uma redução drástica na eficiência de produção de energia.

Diante dos vários efeitos que afetam a concentração efetiva em um sistema HCPV, determinar a precisão do sistema de rastreamento e os seus efeitos sobre a geração de energia são de vital importância no monitoramento, operação e manutenção desse tipo de sistemas. À medida em que o ângulo de abertura solar reduz, as exigências em rastreamento são incrementadas.

Neste trabalho foram realizados vários experimentos visando avaliar o desempenho e precisão do tracker (rastreador) do sistema HCPV FAE-DEN-UFPE. Para realizar a medição dos desvios angulares entre o plano normal da superfície dos módulos e os raios solares foi utilizado o sensor de apontamento desenvolvido por Negreiros (2013). O principal objetivo do dispositivo é medir a condição de desalinhamento do Tracker em relação aos raios solares.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS RASTREADORES SOLARES

De um modo geral os sistemas fotovoltaicos com concentração podem apresentar ou não a exigência de rastreamento em função do nível de concentração (baixo, médio ou alto). Dessa forma os sistemas podem ser estáticos, com concentração em um eixo ou em dois eixos. No caso dos sistemas HCPV é exclusivamente requerida a utilização

de rastreadores solares em dois eixos, por causa da existência de uma elevada seletividade do recurso solar nos sistemas ópticos utilizados, os quais aproveitam só uma porção da radiação solar incidente (a Irradiância Solar Direta ou DNI sigla em inglês de Direct Normal Irradiance), sendo necessário manter a superfície dos módulos sempre perpendiculares aos raios do Sol. Esse tipo de sistema é posicionado usualmente em diversos suportes e estruturas que facilitam o acompanhamento do Sol. Os sistemas comumente utilizados são:

- Sistemas de seguimento em pedestais.
- Sistemas de seguimento em estruturas com giro.
- Sistemas de prato giratório

Os sistemas de seguimento em pedestais são comumente utilizados em sistemas comerciais, por que permitem acomodar os módulos em uma estrutura móvel sobre um pedestal, Fig. 1(a). O seguimento é feito utilizando braços mecânicos ou engrenagens acionadas por motores e uma caixa de redução. A estrutura com os módulos pode ser movimentada em torno de eixos nos sentidos norte-sul, leste-oeste ou em elevação e azimute. Esse tipo de estrutura fornece uma certa facilidade para o alinhamento durante a instalação, tendo a desvantagem de que a precisão do sistema de seguimento pode ser afetada pela carga adicional do vento, sendo requeridos sistemas mecânicos robustos.

Os sistemas de seguimento em dois eixos dispostos em estruturas com giro têm a vantagem de serem menos afetados pelo vento, mas precisam de mais rolamentos, ligações e nivelamento das estruturas de suporte para alinhar os módulos. O eixo de rotação é usualmente orientado na direção norte-sul minimizando os efeitos de sombreamento dos módulos adjacentes, Fig. 1(b).

Os sistemas de prato giratório, Fig. 1(c), oferecem uma configuração com menos carga em função do vento, utilizam estruturas, suportes e motores menores, mas representam um cenário de instalação mais complexo.

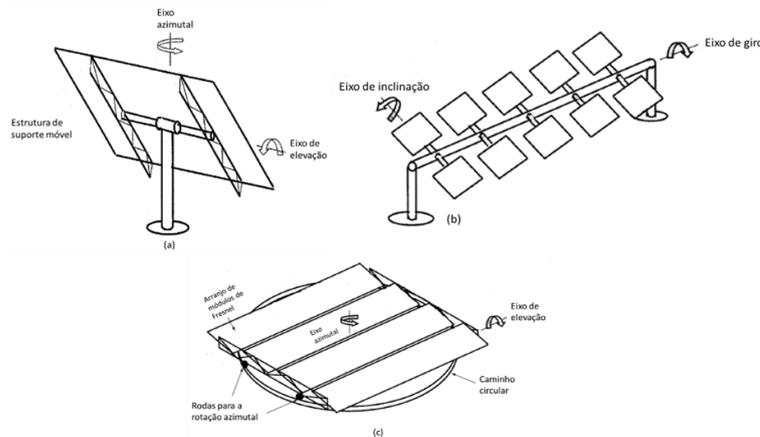


Figura 1 - Exemplos das diferentes abordagens nos sistemas de seguimento em dois eixos (a) tipo pedestal, (b) tipo estrutura com giro e (c) tipo prato giratório. Fonte: Adaptado de Luque e Hegedus (2011).

Existem principalmente duas abordagens dos sistemas de controle dos dispositivos de seguimento:

- Sistemas em malha fechada. Essa abordagem de controle baseia-se no sensoriamento direto do Sol. O dispositivo utilizado permite uma retroalimentação constante da posição do Sol, mas é altamente sensível à nebulosidade, requerendo também, um posicionamento automático para orientar -se em direção ao leste no início do dia.

- Sistemas em malha aberta. Esse tipo de controle utiliza equações que permitem acompanhar os movimentos do Sol e da Terra. Esse método precisa de equipamentos computacionais com um relógio interno e um sistema de posicionamento de alta precisão. Os sistemas em malha aberta requerem um ponto de referência para iniciar sua operação e um processo de calibração para maior confiabilidade. É especialmente recomendado para aplicações de sistemas com concentração devido a que não são afetados por nuvens, níveis de irradiância ou outros distúrbios óticos. Os rastreadores solares de alta precisão utilizam normalmente os dois tipos de controle.

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. O estudo mostrou que as reduções mais acentuadas na concentração com o aumento do desvio do rastreamento são obtidas para superfícies de melhor qualidade onde, em superfícies sem erros ópticos e espelhos de boa qualidade, a concentração média reduz cerca de 30% quando o ângulo de desalinhamento passa de $0,1^\circ$ a $0,3^\circ$. Desalinhamentos da ordem de $0,4^\circ$ reduzem a concentração dessas superfícies em até 67%. Para erros de rastreamento inferiores a $0,1^\circ$, a queda na concentração é pequena, ocasionando uma perda máxima de 5% na concentração. Quando o desalinhamento atinge ângulos maiores que $0,65^\circ$ nenhuma imagem será formada sobre o absorvedor. O estudo relatado foi realizado com um sistema de calha parabólica (2D). Um exemplo do processo de projeto, desenvolvimento e aplicação de sistemas de seguimento de alta precisão por parte de uma das empresas líderes do mercado de sistemas de rastreamento solar é apresentado em detalhe por Luque (2010).

3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA HCPV DEN-FAE- UFPE

Como objeto de estudo foi analisado o comportamento do sistema HCPV DEN-FAE-UFPE através do acompanhamento da instalação, comissionamento e início de operação em setembro de 2013 (Uribe, 2014). O sistema está composto por 30 módulos de alta concentração (1000x) cada um com uma potência nominal de 365 Wp e uma eficiência de 29% em Condições Padrão de Teste para Sistemas com Concentração (CSTC – Concentration Standard Test Conditions). A alta concentração é alcançada através da utilização de lentes de Fresnel instaladas na área de abertura do módulo, associada a uma óptica secundária acoplada à célula. A associação da ótica primária ao dispositivo secundário permite um ângulo de aceitação das na ordem de $1,2^\circ$, de acordo com o fabricante.

Por meio das medições no primeiro ano de funcionamento do sistema foi possível estabelecer as suas características gerais de geração de energia em condições reais de operação. Foi comprovado que o gerador opera com uma eficiência média da ordem de 23,40%, com variações entre 20% e 26%. Comparando-se a eficiência máxima e a eficiência média do gerador com a eficiência do módulo fornecida pelo fabricante em condições CSTC (29%), verificaram-se diferenças da ordem de 24% e 12% respectivamente. Os principais fatores que podem resultar em uma eficiência inferior à nominal são: o descasamento nos parâmetros dos módulos no arranjo; problemas ópticos relacionados com o efeito de sombreamentos parciais; o acúmulo de poeira na superfície dos módulos; problemas de condensação no interior dos mesmos e a precisão do sistema de seguimento (Uribe *et al.*, 2015).

Um dos grandes desafios tecnológicos a serem superados pelos sistemas HCPV de características similares, está em conseguir que a estrutura de suporte mantenha alinhados os módulos acompanhando o Sol dentro de pequenas faixas angulares de operação. Tudo isto consumindo com eficiência a menor quantidade de energia possível. Os módulos fotovoltaicos estão distribuídos em dois arranjos interconectados eletricamente totalizando uma potência instalada de 10,95 kWp, também em condições CSTC. Cada módulo possui uma área de $1,27 \text{ m}^2$ e um peso aproximado de 40 kg totalizando 1200 kg sem ter em conta o peso da estrutura de suporte. De um modo geral o sistema de seguimento foi projetado para suportar, uma carga máxima de 2000 kg e operar com um baixo consumo de energia (aproximadamente 0,8 kWh/dia) com alta precisão no seguimento solar (aproximadamente $0,1^\circ$). O sistema HCPV DEN-FAE-UFPE é apresentado na Fig. 2.



Figura 2 – Sistema HCPV DEN-FAE-UFPE.

A estratégia de controle utilizada no sistema de rastreamento solar do sistema HCPV DEN-FAE-UFPE, é característica dos sistemas de seguimento de alta precisão agregando os dois tipos fundamentais de controle mencionados anteriormente. No seu interior o controle em malha aberta, baseado na utilização de um conjunto de equações conhecidas como as efemérides, fornecem a localização estimada do Sol baseada na sua posição astronômica orientando o tracker em direção ao Sol em condições de céu nublado. O controle em malha fechada, além de utilizar as equações para encontrar a localização do Sol, também utiliza um sensor de alinhamento através do qual é realizado um ajuste de maior precisão em condições de boa irradiância. No entanto, o controle em malha fechada com o sensor só funciona com um nível mínimo de radiação solar normal ao plano do coletor. A radiação no plano do coletor é medida por uma célula fotovoltaica de referência (Fig. 3). Por meio desta célula o sistema de controle é capaz de saber se a radiação é suficiente para ativar o sensor de alinhamento. O diagrama esquemático do sistema de rastreamento do sistema HCPV DEN-FAE-UFPE é apresentado na Fig. 3.



Figura 3 – Diagrama esquemático dos componentes do sistema de rastreamento implementados no gerador HCPV DEN-FAE-UFPE.

4. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

O processo de avaliação do impacto da precisão do sistema de rastreamento solar sobre a geração de energia no sistema HCPV DEN-FAE-UFPE foi realizado através de vários experimentos, visando quantificar as perdas na geração de energia associada ângulo de desvio entre a normal do coletor e os raios solares. Para a realização dos experimentos foi utilizado o sensor de apontamento desenvolvido Negreiros (2013) o qual permitiu calcular com uma elevada precisão o desempenho do sistema de rastreamento. Para realização do experimento, o aparato experimental foi montado em uma das laterais do rastreador, como é possível visualizar na Fig. 4. Toda a estrutura de suporte do sensor foi nivelada de acordo com a orientação do próprio rastreador, para garantir a máxima precisão das medidas.

Esse sensor é composto por um tubo preto, o qual, em uma das extremidades (tampa superior) apresenta um pequeno orifício em forma de circunferência (1 mm de diâmetro) por onde irão ingressar os raios solares. A uma distância específica do orifício (35 mm) é posicionada 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 (tampa inferior) ocorre sempre a uma distância fixa da lente, o que mantém um tamanho fixo da imagem, visualizado também na Fig. 4. O tamanho da imagem formada na base do tubo depende do diâmetro do furo na tampa superior e também da distância entre a lente e o fundo do tubo. Na base do tubo encontram-se dois transdutores sensíveis à luz solar. Os transdutores são dois Resistores Dependentes de Luz (LDR). Os LDR's no fundo do tubo estão localizados de forma que, o LDR 1 esteja alinhado com o orifício da tampa superior. O objetivo desse 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 (Negreiros, 2013).

No processo de desalinhamento da imagem em relação à área sensível do fotoresistor o ângulo de desvio representa o desalinhamento do tracker com os raios solares. A variação do ângulo de desvio expressa distância que a imagem percorreu em relação ao LDR1. Este espaço percorrido está relacionado com a distância percorrida pelo Sol. Esta distância pode ser representada pelo ângulo de deslocamento do Sol durante o período de tempo analisado.

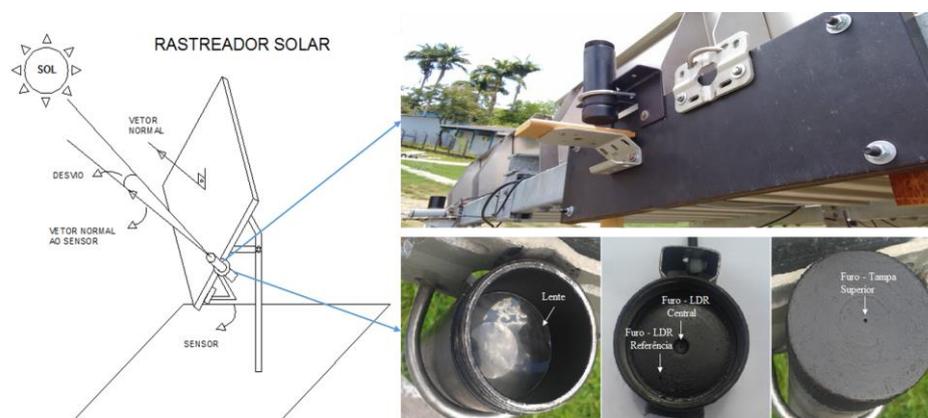


Figura 4 – Posicionamento e composição do sensor de apontamento desenvolvido por Negreiros (2013) utilizado na determinação da precisão do sistema de rastreamento do gerador HCPV DEN-FAE-UFPE.

Existe um ângulo máximo que o Sol pode percorrer de forma que o sensor ainda detecte o alinhamento. Este é o erro limite que o sensor pode detectar. Para um erro inferior a esse, o sensor de apontamento indica que o sistema

encontra-se alinhado. Como já mencionado anteriormente, esse erro depende do tamanho da imagem e do tamanho da área sensível do LDR1. Em Negreiros (2013) foram apresentadas equações que calculam o erro de acordo com o tamanho dos furos da tampa superior e do furo do LDR central. Neste trabalho foram ajustados os furos de acordo com estas equações de forma que os erros pretendidos para a medição do desalinhamento foram de $0,1^\circ$ e $0,4^\circ$. O objetivo é medir o comportamento do sistema de rastreamento em relação a estes *sets points*, de forma que seja possível verificar a ocorrência de erros inferiores e superiores a estes pontos.

As medições foram realizadas ao longo de vários dias no horário antes do meio dia solar, entre as 8:00h e as 10:00h para garantir uniformidade tanto no recurso solar quanto na velocidade de deslocamento aparente do Sol. Em particular foram utilizadas as medições realizadas no dia 11/02/2015 as quais se caracterizaram por possuir um céu claro. A análise realizada iniciou com a identificação de uma posição do tracker onde foi registrada a máxima potência de saída no período de medição em função da irradiância incidente no plano do gerador. Nesse ponto o sistema de seguimento foi desligado, mantendo a posição inicial fixa ao longo do experimento. Dessa forma foi possível estabelecer as perdas na geração de potência em função do tempo e do ângulo de deslocamento entre os raios do Sol e o vector normal ao plano do coletor. Com os cálculos da posição solar foi possível estabelecer a tolerância do sistema ao desalinhamento. Os dados obtidos são mostrados na próxima seção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a metodologia estabelecida, os experimentos realizados no sistema HCPV DEN-FAE-UFPE permitiram estabelecer o comportamento da potência com o desalinhamento gradual provocado pelo movimento aparente do Sol. Como foi mencionado anteriormente, o sistema foi alinhado com o Sol atingindo, em determinado momento, a máxima geração de potência de saída em função da DNI (irradiância direta normal) incidente. O valor da potência registrada em nesse instante foi de 7300W. Após do desligamento do sistema de seguimento foi registrado ponto a ponto o decaimento da potência ao longo do tempo. A Fig. 5 mostra o comportamento do decaimento da potência com o desalinhamento progressivo dos raios solares em função do tempo.

Foi possível determinar experimentalmente, também na Fig. 5, como a geração de potência decai ao longo do tempo até chegar a zero. O tempo para o decaimento total na potência gerada foi de aproximadamente 17 minutos. Este experimento foi repetido duas vezes, onde mudanças pouco significativas no tempo de decaimento da potência gerada foram registradas. Cabe ressaltar que esse tempo é fortemente dependente do horário de medição.

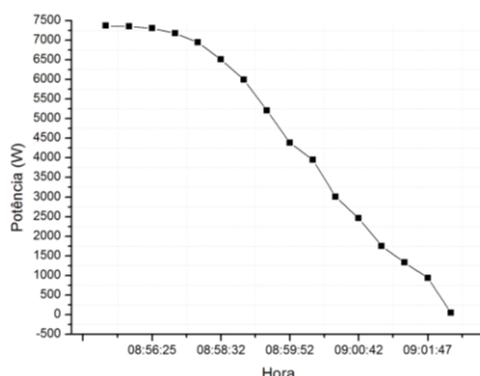


Figura 5 – Decaimento gradual na geração de potência como consequência direta do ângulo de deslocamento do Sol ao longo do período de análise.

Tomando-se o tracker como referência, o deslocamento do Sol acontece ao longo do tempo afetando principalmente os ângulos zenital e azimutal. A variação desses ângulos provoca o desvio do tracker em relação à direção dos raios solares. A Fig. 6 mostra a variação dos ângulos de azimutal e zenital ao longo do tempo e o progressivo decaimento percentual da potência.

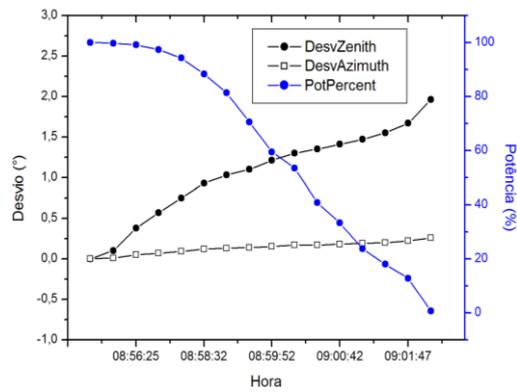


Figura 6 – Decaimento na geração de potência em função dos ângulos de azimute e Zênite.

Ao longo do período analisado verifica-se uma pequena variação no desvio do ângulo azimutal, e um desvio significativo no ângulo zenital. A variação do ângulo azimutal é pequena devido ao horário em que foi realizado o experimento.

Na Fig. 7 observa-se a queda da potência gerada e o ângulo Θ , que representa o desvio entre a normal do coletor e os raios do Sol em função do tempo.

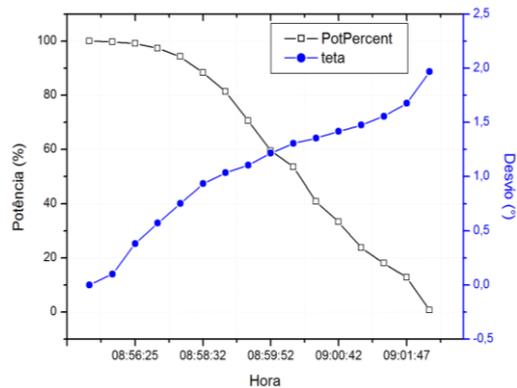


Figura 7 – Decaimento na geração de potência em função do desvio Θ ao longo do tempo.

Verifica-se que, devido à baixa influência do ângulo azimutal (mostrada na Fig. 6) o comportamento do desvio de Θ (Fig. 7) segue o mesmo perfil do comportamento do ângulo zenital no intervalo de tempo observado.

A dependência dos resultados obtidos com relação ao período no qual os ensaios foram realizados pode ser eliminada verificando-se a relação entre a queda de potência do gerador HCPV e o ângulo Θ . O ângulo Θ é facilmente calculado em função dos ângulos zenital e azimutal do rastreador. Dessa forma é possível quantificar o desalinhamento do tracker, retirando a dependência temporal.

Na Fig. 8 é possível verificar o comportamento percentual da potência em função do ângulo Θ .

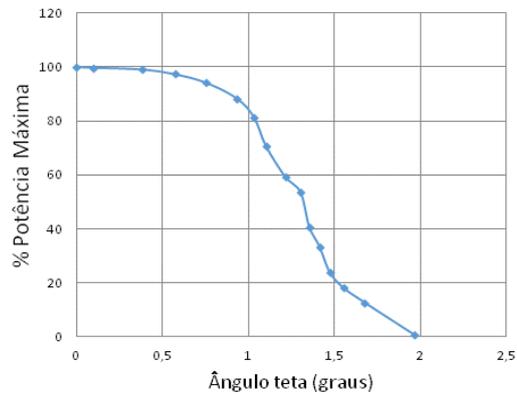


Figura 8 – Decaimento Percentual da potência em função do desvio Θ .

Verifica-se, também na Fig. 8, um patamar no comportamento da potência com a geração de aproximadamente 100% do valor máximo até um ângulo da ordem de 0,4 graus. O gerador mantém uma geração superior a 60% de seu valor máximo até um ângulo de desalinhamento de aproximadamente 1,2 graus. Acima de 1,5 graus a potência gerada

apresenta-se abaixo de 20% do valor máximo. Cabe salientar que o ângulo de abertura dos módulos mencionado pelo fabricante é da ordem de $1,2^\circ$. Para esse valor observa-se uma perda de potência em torno de 30% .

Como já mencionado anteriormente, o sensor de apontamento permite verificar se o rastreador encontra-se alinhado ou desalinhado para um determinado erro. O experimento montado levou em consideração dois desvios específicos ($0,1^\circ$) e ($0,4^\circ$). Isto significa dizer que o sensor montado permite verificar se o tracker está alinhado ou desalinhado para esses erros específicos. Conforme mostrado anteriormente na Fig. 8, o sistema possui uma tolerância muito boa para essa faixa de desalinhamento ou seja, o desalinhamento para valores de até $0,4^\circ$ ainda permite a geração de praticamente 100% da potência total.

Após vários dias de ensaios, no dia 03-03-2015, durante o período da manhã, foi possível obter as condições ideais (céu claro e estável) para a análise com o sensor de apontamento. Os dados mostraram que durante todo o período de medição o rastreador manteve-se alinhado com um erro inferior a $0,4^\circ$, Fig. 9. No período total de medição, considerando-se os desvios mencionados, verificou-se que o tracker manteve-se alinhado em 100% das medições. Já em relação ao desvio de $0,1^\circ$, os resultados mostraram que apenas em 1,34% das medições que o tracker manteve-se alinhado com um desvio menor que $0,1^\circ$. A Fig. 9 mostra o comportamento das medições ao longo do tempo. O valor zero no gráfico representa o desalinhamento e o valor 1 representa o alinhamento.

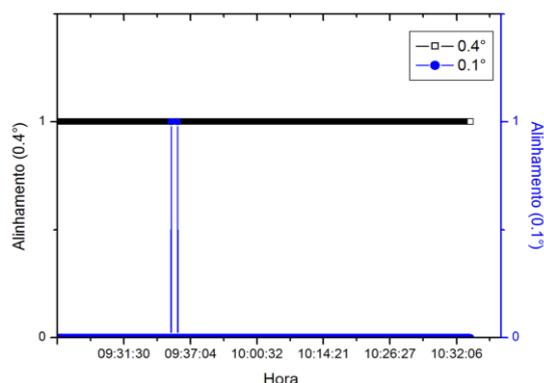


Figura 9 – Condição de alinhamento ou desalinhamento do sensor de apontamento

6. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que a potência gerada pelo sistema HCPV decai com o desvio entre a superfície coletora e os raios solares. O ângulo de desalinhamento máximo para o qual o tracker deixa de gerar energia é de $1,96^\circ$.

Foi verificado com o sensor de apontamento que o rastreador manteve-se alinhado com um erro menor que $0,4^\circ$ durante todo o tempo do experimento. No entanto, apenas 1,34% das medições mostraram um erro inferior a $0,1^\circ$.

Em contrapartida é importante salientar que para um erro entre $0,1^\circ$ e $0,4^\circ$ a potência gerada na saída do sistema mantém-se praticamente a 100% do valor máximo (a redução é de aproximadamente 1%). O que mostra que o sistema de seguimento opera de acordo com esperado.

Essa alta tolerância apresentada ao desalinhamento até um ângulo de $0,4^\circ$ deve-se ao fato de que o módulo tem uma óptica secundária sobre as células que garante a formação da imagem com ângulos superiores a $0,1^\circ$, valor usualmente recomendado como máximo de tolerância para rastreadores utilizados em sistemas de alta concentração.

O dispositivo óptico secundário utilizado no módulo fotovoltaico atua de forma eficiente, proporcionando um maior ângulo de abertura e garantindo a geração de energia de aproximadamente 100% com desvios de rastreamento da ordem de $0,4^\circ$, maiores que os exigidos em rastreadores para alta concentração.

Os resultados obtidos indicaram que para um erro de $1,2^\circ$ (ângulo de abertura do módulo – catálogo do fabricante) a perda na geração de potência foi de aproximadamente 30%.

Agradecimentos

À Abengoa Brasil, responsável pelos recursos que permitiram a realização deste trabalho. À Capes e PROTENDEN-UFPE pelo apoio fornecido.

REFERÊNCIAS

- García-Domingo, B.; Aguilera, J.; de la Casa, M. F., 2014. Modelling the influence of atmospheric conditions on the outdoor real performance of a CPV (Concentrated Photovoltaic) module. *Energy*, 70. pp.239–250.
- Gombert, A.; Heile, I.; Wullner, J.; Gertsmaier, T.; van Riesen S.; Gertser, E.; Rottger, M.; 2010. Recent progress in concentrator photovoltaics. *Photonics for Solar ENergy Systems III*. pp. 772508–772508–9.

- Hontoria, L.; Pérez-Higueras, P.; Terrados, J.; Almonacid, G.; 2012. *A Real Alternative for Producing Solar Electricity: The CPV. Current State of CPV: A Review*.
- Luque, A. & Andreev, V., 2007. *Concentrator Photovoltaics* A. L. Luque & A. Viacheslav, eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Luque, A.; Hegedus, S. 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2nd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Luque, I., 2010. Control de seguimiento solar de alta precisión con autocalibración. *Universidad Politécnica de Madrid*, pp.1–305.
- Negreiros, A. C. F. 2013. Desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para um rastreador solar de alta precisão. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares (PROTEN).
- O’Gallagher, J.J., 2008. Nonimaging optics in solar energy. *Synthesis Lectures on Energy and the Environment: Technology, Science, and Society*, 2(1), pp.1–120.
- Pedrosa Filho, M.H.O., Vilela, O.C.; Fraidenraich, N.; 2010. Avaliação da influência dos desvios óticos e de rastreamento na concentração de coletor parabólico linear. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 14, pp.101–108.
- Soitec, 2015. Four-junction solar cell developed using Soitec's expertise in semiconductor materials sets new efficiency record of 38.9% for CPV module. Disponível em: < <http://www.soitec.com/en/news/press-releases/article-1737>>. Acesso em: 31 Julho 2015.
- Uribe, F. J. B. ; Veloso, D. ; Vilela, O. C. ; Bottler, B. H. ; Barbosa, E. M. DE S. ; Fradenraich, N. 2014. Primeiras Experiências Práticas e Desafios Técnicos de um Sistema Fotovoltaico de Alta Concentração. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife. Anais do V Congresso de Energia Solar. Recife: ABENS, 2014.
- Uribe, F. J. B. ; Vilela, O. C. ; Velozo, D. R.; Negreiros, A. C.; Barbosa, E. M. DE S. ; Fradenraich, N.; 2015. Resultados do Desempenho e Análise Operacional de um Sistema Fotovoltaico de 10 kWp de Alta Concentração Interligado à Rede: Primeiro Ano De Operação. In: XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente: ASADES.

IMPACTS OF SOLAR TRACKER MISALIGNMENTS ON HIGH CONCENTRATING SYSTEMS: CASE STUDY FOR HCPV SYSTEM DEN-FAE-UFPE

Abstract. *The paper presents the analysis of the impact of power generation caused by misalignment between the physical structure of the tracker and the sun's rays. It was used as an object of study the Photovoltaic system of high concentration (HCPV - High Concentrator Photovoltaics) installed by the Group for Alternative Energy Sources (FAE) in the Department of Nuclear Energy (DEN) at the Federal University of Pernambuco (UFPE). Through the measurements it was possible to quantify the decay of power generation in the system output due to the increase in deviation angle between the normal vector to the generator of the plan and the sun's rays. This document presents the main features of HCPV system used, the implemented methodology and a description of a pointing sensor that was developed the experiment.*

Keywords: *HCPV systems, solar tracking, alignment evaluation.*