

## ESTIMATIVA DO GANHO PROPORCIONADO COM O USO DE SEGUIMENTO SOLAR PARA FORTALEZA/CE

**José Itanor do Couto Rocha Filho** - itanor@dee.ufc.br  
**Ivonne Montero Dupont** - ivonne.mdupont@gmail.com  
**Aluísio Vieira Carneiro** - avcarneiros@gmail.com  
**Camylla Maria Narciso de Melo** - camyllammelo@gmail.com  
**Deivid Matias de Freitas** - deivid\_ce@hotmail.com  
**Igor de Sousa Holanda** - igorsousaholanda@hotmail.com  
**Jamil Cavalcante Kerbage** - jamilkerbage@hotmail.com  
**Orlene Maia Alves** - orlene\_maia@hotmail.com  
**Paulo Cesar Marques de Carvalho** - carvalho@dee.ufc.br  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** *Uma das restrições técnicas à difusão de projetos de uso de energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão fotovoltaica (FV), o que faz com que se busquem alternativas para maximizar o aproveitamento da irradiação solar por estes sistemas. Entre estas alternativas está o uso de seguimento solar, o que faz com que a superfície de captação solar esteja voltada para o Sol, acompanhando o seu movimento e, assim, captando mais irradiação. No presente trabalho, a partir de dados de irradiação solar no plano horizontal medidos por meio de um piranômetro instalado no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC), foram estimados valores de irradiação em uma superfície fixa com determinada inclinação em relação à horizontal e em uma superfície com a mesma inclinação e com seguimento solar de leste a oeste, ambas na mesma localidade. Os resultados mostram que, com o uso de seguimento solar, obteve-se um ganho na irradiação solar captada de 8,2% em média anual, podendo chegar a um valor máximo de 12,7% em média mensal.*

**Palavras-chave:** Energia Solar, Seguimento Solar, Sistemas Fotovoltaicos.

### 1. INTRODUÇÃO

Diante dos novos desafios inerentes às metas para redução das emissões de carbono, as fontes renováveis se apresentam como limpas e de menor impacto ambiental. Devido à característica na sua maioria estocástica, estas fontes apresentam intermitências. Porém, no Brasil, estas fontes configuram-se de forma complementar à geração hidroelétrica. Entre estas fontes renováveis pode se destacar a energia solar, cuja forma de uso mais conhecida consiste na geração FV, cuja utilização tem crescido nos últimos anos ao redor do mundo, com vantagens como o fato de ser inesgotável.

O Brasil é localizado em posição geográfica privilegiada quanto ao nível de irradiação solar incidente por metro quadrado. A irradiação média anual varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>, valores que são significativamente superiores à maioria dos países europeus, cujas estatísticas indicam intervalos entre 900 e 1.850 kWh/m<sup>2</sup> (EPE, 2012). Porém, alguns dos fatores que ainda desmotivam um maior uso da geração FV consistem no alto custo e a baixa eficiência dos equipamentos envolvidos na conversão da energia solar em energia elétrica.

Como forma de tornar este tipo de geração mais atrativa, tem-se desenvolvido tecnologias de aumento de eficiência. Entre estas tecnologias estão os seguidores solares, que ao serem conectados a uma superfície de coleta de energia solar, permitem que mais irradiação solar possa ser captada pela superfície ao se fazer com que a mesma acompanhe o movimento do Sol ao longo do dia e, assim, os raios solares incidam de forma perpendicular à superfície.

Com um seguidor solar, é possível se obter consideráveis ganhos na irradiação solar captada por uma superfície com relativa simplicidade e baixo custo. Um seguidor solar pode permitir a movimentação da superfície coletora em torno de um eixo ou de dois eixos. Os seguidores de dois eixos são mais usados em locais em que a variação da duração do dia e da noite é considerável ao longo do ano e possuem um maior custo e uma maior complexidade.

Considerando o fato de Fortaleza/CE se situar próxima à Linha do Equador, não existem grandes variações na duração dos dias e das noites ao longo do ano. Com isso, se torna mais vantajoso o uso do seguimento de um eixo, de leste a oeste, nesta localidade.

No presente trabalho utiliza-se uma metodologia de cálculo, presente em Duffie (1991), para se estimar a irradiação solar que seria captada por duas diferentes superfícies:

- 1- Sistema de captação fixo e com inclinação de 15° em relação à horizontal;
- 2- Sistema de captação inclinado de 15° em relação à horizontal e dotado de seguimento solar de um eixo.

Definiu-se a inclinação de 15° para evitar acúmulo de poeira e por ser a inclinação de módulos FV instalados no teto do LEA da UFC. Como base de dados para esta estimativa, foram utilizados dados de irradiação solar coletados por um piranômetro instalado em disposição horizontal no LEA.

Com essa estimativa é possível ter uma noção dos ganhos de irradiação solar captada que seriam proporcionados pelo uso de seguimento solar na cidade de Fortaleza/CE e se verificar o potencial para o uso desta tecnologia nesta localidade.

## 2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS

### 2.1 Dados de irradiação utilizados

Para o cálculo das estimativas, primeiramente foram escolhidos 12 meses entre maio de 2003 e março de 2005, devido a indisponibilidade de dados de forma contínua ao longo de 1 mês inteiro em anos mais recentes. Foram escolhidos meses de anos diferentes como forma de se reduzir os efeitos de um ano “atípico”, em relação aos valores de irradiação solar, nos resultados que se deseja obter. Utilizando-se meses de anos diferentes se tem uma melhor aproximação dos valores de irradiação solar média referentes ao período de um ano na localidade. Outro motivo desta escolha foi o fato de que, em determinados meses dentro desse período, as medições apresentaram problemas e em certos dias não foram coletados dados.

Para cada mês escolhido, escolheu-se um dia que pudesse representar o mês, de forma a não ser necessário se trabalhar com todos os dias do mês. Para a escolha desse dia representativo, verificou-se o dia do mês cujo valor da irradiação média diária fosse a mais próxima possível do valor da irradiação média diária ao longo do mês. Com isso, o ganho obtido ao longo do dia representativo do mês seria um valor médio do ganho obtido ao longo de todos os dias do mesmo mês.

Os dados de irradiação coletados pelo piranômetro constam do horário entre as 05 horas e as 18 horas, com um dado a cada 10 minutos. Para o cálculo das estimativas, utilizou-se o valor de irradiação médio a cada hora.

### 2.2 Descrição da metodologia utilizada

Para o cálculo das estimativas desejadas utilizou-se como base a metodologia presente em Duffie (1991). Primeiramente, tem-se que as estimativas que se deseja obter ao final dos cálculos são: a irradiação solar global em uma superfície inclinada fixa  $I_{\beta}$ , dada pela Eq. (1); e a irradiação solar global em uma superfície inclinada com seguimento de um eixo  $I_{\beta m}$ , dada pela Eq. (2).

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (1)$$

$$I_{\beta m} = I_{b\beta m} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (2)$$

Onde:

$I_{b\beta}$ : irradiação direta em uma superfície inclinada fixa;

$I_{d\beta}$ : irradiação difusa em uma superfície inclinada;

$I_{r\beta}$ : irradiação refletida pelo entorno em uma superfície inclinada;

$I_{b\beta m}$ : irradiação direta em uma superfície inclinada com seguimento de um eixo.

Para a obtenção dessas estimativas, deve-se realizar a sequência de passos descrita a seguir:

1) Calcular a irradiação extraterrestre incidente em uma superfície horizontal  $I_o$ , em um tempo específico, por meio da Eq. (3).

$$I_o = \frac{12}{\pi} I_{cs} E_o [(w_2 - w_1) \text{sen} \delta \text{sen} \varnothing + \text{cos} \delta \text{cos} \varnothing (\text{sen} w_2 - \text{sen} w_1)] \quad (3)$$

Onde:  $I_{cs}$  é a constante solar, com valor igual a 1367 W/m<sup>2</sup>;  $E_o$  é o fator de correção de excentricidade da órbita planetária, podendo ser obtido de forma simplificada por meio da Eq. (4);  $w_2$  e  $w_1$  são os ângulos horários, em radianos, obtidos com a Eq. (5), e que definem, respectivamente, o final e o início do intervalo de tempo considerado;  $\varnothing$  representa a latitude local, que no caso da cidade de Fortaleza/CE será igual a -3,75° (Maps of World, 2015); e  $\delta$  a declinação solar, obtida por meio da Eq. (6).

$$E_o = 1 + 0,033 \text{cos} \left( \frac{360 nd}{365} \right) \quad (4)$$

O parâmetro  $nd$  representa o número do dia do ano. Como exemplo, para o dia 12 de março o valor de  $nd$  é 71, pois é o 71° dia do ano.

$$w = \frac{\text{min}}{4} \quad (5)$$

O ângulo horário  $w$  corresponde ao ângulo do Sol em relação ao meio dia. Este ângulo começa a ser contado a partir do meio-dia, ou seja, às 12 horas tem seu valor igual a zero, com valores positivos à tarde e negativos pela manhã, variando  $15^\circ$  a cada hora. Na Eq. (5), o parâmetro  $min$  representa a quantidade de minutos que já se passaram do horário local em relação ao meio-dia. Por exemplo, para o horário de 14 horas, tem-se que já se passaram 120 minutos do meio-dia. Portanto, o parâmetro  $min$  será igual a 120 e, utilizando-se a Eq. (5), obtém-se o ângulo horário de  $30^\circ$ .

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360 (nd+284)}{365} \right] \quad (6)$$

A inclinação do eixo polar da Terra em relação à normal do plano da órbita terrestre, de valor igual a  $23,45^\circ$ , causa uma variação da trajetória do Sol entre o Norte e o Sul no decorrer do ano, ocasionando uma variação do ângulo de incidência dos seus raios em relação ao plano do Equador. Esse ângulo de inclinação é denominado de declinação solar. Por exemplo, um observador na linha do equador da Terra vê o Sol entre os dias 21 de março e 23 de setembro, que é o período em que a declinação solar tem valores positivos, sempre ao Norte, enquanto que, em todos os outros dias do ano, quando a declinação possui valores negativos, ele vê ao Sul (Rocha, 2013).

2) Obter o valor do parâmetro  $k_t$ , por meio da Eq. (7), que se refere ao índice de claridade ou transmitância atmosférica.

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (7)$$

O parâmetro  $I$  corresponde ao valor de irradiação solar global diária em média horária, obtida a partir das medições feitas pelo piranômetro.

3) Calcular o valor do parâmetro  $k_d$ , a partir do valor de  $k_t$ , através das Eqs. (8), (9) e (10). Este parâmetro representa a fração difusa da irradiação global, ou seja, indica o nível de presença da irradiação difusa na irradiação global.

$$\text{Se } k_t \leq 0,22 \rightarrow k_d = 1 - 0,09k_t \quad (8)$$

$$\text{Se } 0,22 < k_t \leq 0,8 \rightarrow k_d = 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388 k_t^2 - 16,638 k_t^3 + 12,336k_t^4 \quad (9)$$

$$\text{Se } k_t > 0,8 \rightarrow k_d = 0,165 \quad (10)$$

4) Encontrar o valor da irradiação difusa  $I_d$  por meio da Eq. (11).

$$I_d = k_d I \quad (11)$$

5) Calcular a irradiação direta  $I_b$  através da Eq. (12).

$$I_b = I - I_d \quad (12)$$

6) Obter o valor da irradiação difusa para uma superfície inclinada  $I_{d\beta}$  com a Eq. (13).

$$I_{d\beta} = I_d \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (1 - F_1) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \operatorname{sen} \beta \right] \quad (13)$$

O ângulo  $\beta$  consiste no ângulo de inclinação da superfície de captação em relação ao plano horizontal, que foi definido como sendo igual a  $15^\circ$ , como já mencionado anteriormente. Os demais parâmetros,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $a$  e  $b$ , podem ser obtidos com as Eqs. (14), (15), (16) e (17), respectivamente.

$$a = \max (0, \cos \beta) \quad (14)$$

$$b = \max (\cos 85^\circ, \cos \theta_z) \quad (15)$$

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( F_{11} + F_{12} \Delta + F_{13} \theta_z \frac{\pi}{180^\circ} \right) \right] \quad (16)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \Delta + F_{23} \theta_z \frac{\pi}{180^\circ} \quad (17)$$

O ângulo  $\theta_z$  corresponde ao ângulo de zênite e pode ser obtido por meio da Eq. (18). Este ângulo é formado entre a reta normal ao plano horizontal e a reta que liga o Sol à superfície de captação.

$$\cos\theta_z = \text{sen}\varnothing \text{sen}\delta + \cos\varnothing \cos\delta \cos w \quad (18)$$

O valor das constantes  $F_{11}$ ,  $F_{12}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{22}$  e  $F_{23}$  pode ser encontrado na Tab. 1, em função do parâmetro de transparência  $\varepsilon$ , que pode ser obtido através da Eq. (19).

Tabela 1 – Coeficientes  $F_{ij}$  em função de  $\varepsilon$ . Fonte: Duffie, 1991.

| Varição de $\varepsilon$ | $F_{11}$ | $F_{12}$ | $F_{13}$ | $F_{21}$ | $F_{22}$ | $F_{23}$ |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,000 – 1,065            | -0,008   | 0,588    | -0,062   | -0,060   | 0,072    | -0,022   |
| 1,065 – 1,230            | 0,130    | 0,683    | -0,151   | -0,019   | 0,066    | -0,029   |
| 1,230 – 1,500            | 0,330    | 0,487    | -0,221   | 0,055    | -0,064   | -0,026   |
| 1,500 – 1,950            | 0,568    | 0,187    | -0,295   | 0,109    | -0,152   | 0,014    |
| 1,950 – 2,800            | 0,873    | -0,392   | -0,362   | 0,226    | -0,462   | 0,001    |
| 2,800 – 4,500            | 1,132    | -1,237   | -0,412   | 0,288    | -0,823   | 0,056    |
| 4,500 – 6,200            | 1,060    | -1,600   | -0,359   | 0,264    | -1,127   | 0,131    |
| 6,200 – $\infty$         | 0,0678   | -0,327   | -0,250   | 0,156    | -1,377   | 0,251    |

$$\varepsilon = \frac{I_d + \frac{I_b}{\cos\theta_z} + 5.535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}{I_d + 5.535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3} \quad (19)$$

O parâmetro de brilho  $\Delta$  pode ser calculado através da Eq. (20).

$$\Delta = m \cdot \frac{I_d}{I_{on}} \quad (20)$$

O parâmetro  $m$  corresponde à massa de ar, dada pela Eq. (21); e  $I_{on}$  representa a irradiação extraterrestre normal, que pode ser obtida com a Eq. (22).

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (21)$$

$$I_{on} = I_{cs} \cdot E_o \quad (22)$$

7) Calcular a irradiação direta em uma superfície inclinada fixa  $I_{b\beta}$  por meio da Eq. (23).

$$I_{b\beta} = I_b \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_z} \quad (23)$$

Onde  $\theta_i$  representa o ângulo de incidência dos raios solares na superfície de captação e pode ser obtido através da Eq. (24). Quanto menor for esse ângulo, mais perpendicularmente o raio solar irá incidir na superfície de captação e, assim, mais irradiação direta será recebida pela mesma.

$$\cos\theta_i = \cos\beta \cos\theta_z + \text{sen}\beta \text{sen}\theta_z \cos(\gamma_s - \gamma_w) \quad (24)$$

O parâmetro  $\gamma_s$  corresponde ao ângulo de azimute solar, que é o ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e o eixo Norte-Sul. Este ângulo é dado pela Eq. (25).

$$\gamma_s = \text{sig}(w) * \left| \cos^{-1} \left( \frac{\text{sen } \alpha \text{ sen } \varnothing - \text{sen } \delta}{\cos \alpha \cos \varnothing} \right) \right| \quad (25)$$

Em que o parâmetro  $\text{sig}(w)$  pode ser encontrado de acordo com as seguintes condições:

1 - Se  $0 \leq w < 180$  então  $\text{sig}(w) = 1$ ; o que corresponde a um ângulo horário positivo (tarde);

2 - Se  $180 \leq w < 360$  então  $\text{sig}(w) = -1$ ; o que corresponde a um ângulo horário negativo (manhã).

O ângulo  $\alpha$  corresponde ao ângulo de altura solar, que é complementar ao ângulo de zênite e pode ser obtido pela Eq. (26) ou pela Eq. (27).

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (26)$$

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \text{cos } \phi \text{ cos } \delta \text{ cos } w \quad (27)$$

O ângulo  $\gamma_w$  representa o ângulo de azimute da superfície de captação solar, que é o ângulo entre a projeção no plano horizontal da reta normal à superfície e o eixo Norte-Sul. Este ângulo é definido como sendo de  $0^\circ$ , caso a superfície esteja voltada para o Sul, ou de  $180^\circ$ , caso a superfície esteja voltada para o Norte. Como a cidade de Fortaleza está situada no hemisfério Sul, ao se fazer com que a superfície de captação esteja voltada para o Norte, mais radiação poderá ser captada pela mesma, pois em uma maior parte do ano o Sol estará ao Norte. Com isso, a superfície foi definida como sendo voltada para o Norte e o ângulo  $\gamma_w$  será igual a  $180^\circ$ .

8) Obter o valor da irradiação direta incidente em uma superfície inclinada com seguimento de um eixo, por meio da Eq. (28).

$$I_{b\beta m} = I_b \left( \frac{\text{cos } \beta \text{ cos } \theta_z + \text{sen } \beta \text{ sen } \theta_z}{\text{cos } \theta_z} \right) \quad (28)$$

9) Encontrar o valor da irradiação refletida pelo entorno  $I_{r\beta}$ , através da Eq. (29).

$$I_{r\beta} = \frac{I}{2} * I * \rho (1 - \text{cos } \beta) \quad (29)$$

O parâmetro  $\rho$  corresponde ao índice de reflexão da superfície, podendo ser obtido pela razão entre a irradiação refletida por uma superfície e a irradiação incidente sobre a mesma. Adotou-se esse parâmetro como sendo igual a 0,25, já que um grande número de superfícies possui o índice de reflexão na faixa entre 0,20 e 0,25.

10) Somar as componentes da irradiação global encontradas anteriormente para se obter a irradiação incidente tanto em uma superfície inclinada fixa  $I_\beta$ , como em uma inclinada e com seguimento de um eixo  $I_{\beta m}$ , conforme a Eq. (1) e a Eq. (2), respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram desenvolvidas planilhas de cálculo para a aplicação da metodologia descrita no tópico anterior nos 12 dias escolhidos. Com isso, primeiramente, fez-se uma comparação da irradiação que seria coletada por cada superfície analisada ao longo de cada dia escolhido.

Na Fig. 1 tem-se o gráfico das irradiações coletadas no dia representativo do mês de fevereiro de 2005. Pode-se observar que a superfície inclinada com seguimento apresentou valores maiores de irradiação, em comparação com as superfícies fixas, principalmente no período intermediário da manhã e da tarde, como esperado, já que nestes períodos o ângulo de incidência dos raios solares em uma superfície fixa é maior. Por volta do meio-dia, pode-se ver que esse ganho na irradiação coletada pela superfície com seguimento é pequeno, como era de se esperar, já que a posição das superfícies é semelhante neste período do dia.

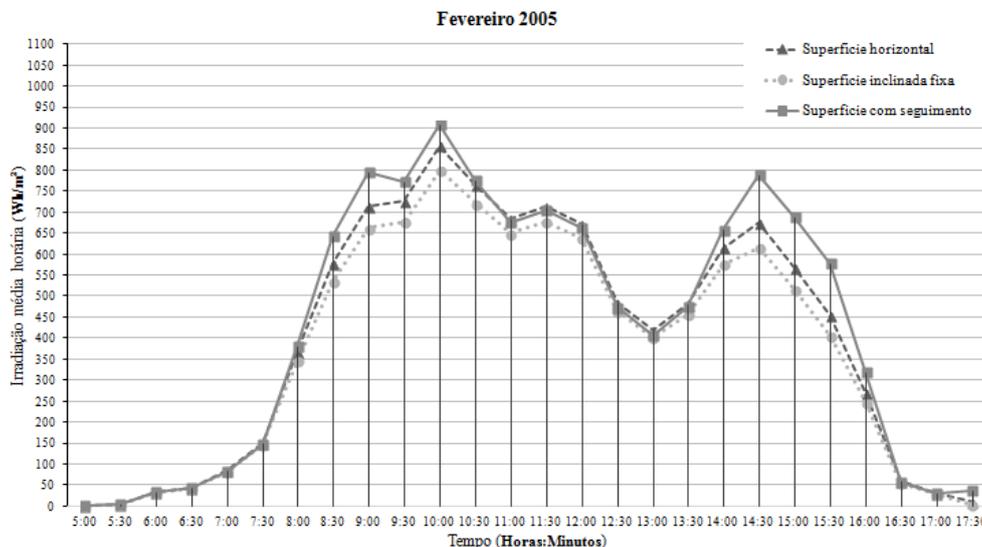


Figura 1 - Irradiação média horária ao longo do dia representativo do mês de fevereiro de 2005.

Outra observação é o fato de que durante todo o dia a irradiação da superfície horizontal foi maior ou igual à irradiação da superfície inclinada fixa. Isso ocorreu devido ao fato de que, durante o mês de fevereiro, a declinação solar apresenta um valor mais negativo que o valor da latitude da cidade de Fortaleza, indicando que o Sol se situa ao Sul daquele local. Com isso, o ângulo de incidência dos raios solares em uma superfície inclinada e voltada para o Norte vai ser maior do que aquele em uma superfície horizontal.

Na Fig. 2 tem-se os valores das irradiações médias diárias coletadas por cada uma das superfícies nos 12 dias representativos escolhidos. Pode-se observar que a superfície com seguimento apresentou ganhos durante boa parte do ano, com valores mais reduzidos nos meses de janeiro a junho, que corresponde ao período de chuvas na cidade de Fortaleza.

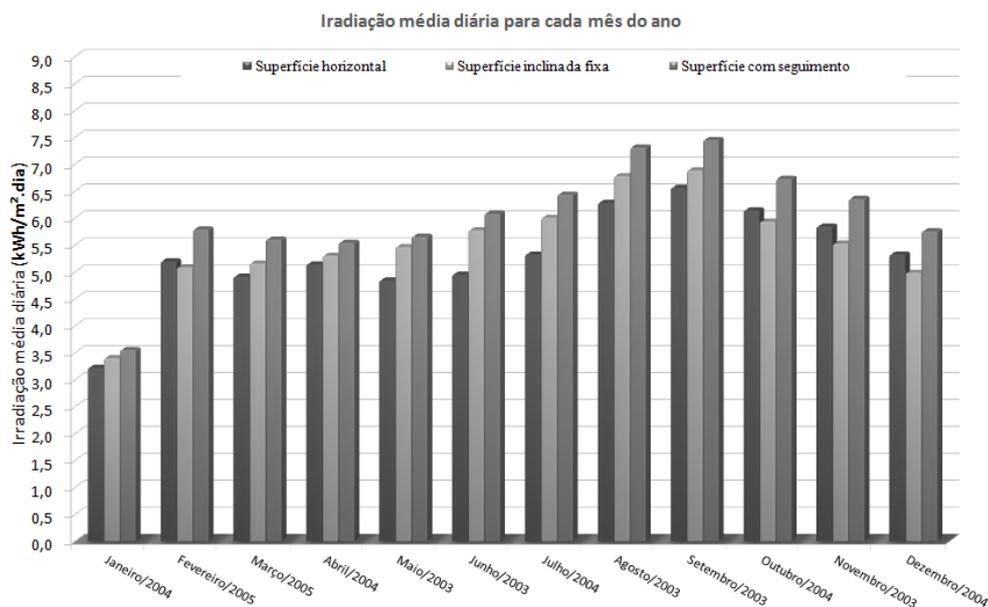


Figura 2 - Irradiação média diária para os dias representativos de cada mês do ano.

Na Tab. 2 estão representados os ganhos de irradiação incidente obtidos com a superfície inclinada fixa em relação à superfície horizontal e com a superfície inclinada com seguimento em relação tanto à superfície horizontal quanto à superfície inclinada fixa. Também na Tab. 2 têm-se os valores da declinação solar do dia selecionado de cada mês e da fração difusa da irradiação total, em média diária, para esses mesmos 12 dias característicos, de modo a analisar os efeitos proporcionados pela inclinação da superfície de captação solar e o uso de seguimento solar de correção de azimute na captação de irradiação.

Tabela 2 - Ganhos de irradiação obtidos e dados referentes aos dias escolhidos.

|                       | Inclinada fixa / Horizontal (%) | Inclinada com seguimento / Horizontal (%) | Inclinada com seguimento / Inclinada fixa (%) | Declinação solar do dia (°) | Fração difusa da irradiação total ( $k_d$ ) em média diária |
|-----------------------|---------------------------------|---|---|-----------------------------|---|
| <b>Janeiro/2004</b>   | -4,82                           | -2,05                                     | 2,95  | -19,49                      | 0,904   |
| <b>Fevereiro/2005</b> | -5,87                           | 4,68                                      | 11,46   | -14,90                      | 0,695   |
| <b>Março/2005</b>     | -2,61                           | 2,24                                      | 4,98  | -4,02                       | 0,674   |
| <b>Abril/2004</b>     | 0,79                            | 7,70                                      | 6,77  | 5,20                        | 0,737   |
| <b>Mai/2003</b>       | 7,69                            | 12,37                                     | 4,26  | 21,60                       | 0,667   |
| <b>Junho/2003</b>     | 8,80                            | 15,10                                     | 5,36  | 22,93                       | 0,610   |
| <b>Julho/2004</b>     | 8,20                            | 16,24                                     | 6,96  | 19,38                       | 0,560   |
| <b>Agosto/2003</b>    | 4,03                            | 14,39                                     | 9,80  | 9,23                        | 0,518   |
| <b>Setembro/2003</b>  | 0,67                            | 11,56                                     | 10,76   | 3,02                        | 0,521   |
| <b>Outubro/2004</b>   | -5,49                           | 4,61                                      | 10,78   | -13,12                      | 0,585   |
| <b>Novembro/2003</b>  | -7,46                           | 3,52                                      | 12,03   | -19,60                      | 0,626   |
| <b>Dezembro/2004</b>  | -8,55                           | 2,86                                      | 12,69   | -23,37                      | 0,680   |
| <b>Média anual</b>    | -0,38                           | 7,77                                      | 8,23  | -                           | 0,648   |

A partir da Tab.2, pode-se verificar que em determinados meses os ganhos da superfície inclinada fixa em relação à superfície horizontal foram negativos. Esses valores negativos podem ser explicados ao se comparar a declinação solar do dia com a latitude local. Sabe-se que nos dias em que a declinação solar apresenta valores mais negativos do que o valor da latitude local,  $-3,75^\circ$ , nos meses de outubro a março, o Sol se situa ao Sul deste local. Com isso, já que a superfície inclinada possui uma inclinação fixa de  $15^\circ$  e está voltada sempre para o Norte, o ângulo de incidência dos raios solares na superfície horizontal será menor do que na superfície inclinada, nestes meses de outubro a março, e consequentemente a superfície horizontal receberá mais irradiação que a superfície inclinada.

Esses ganhos poderiam ser maiores se nos meses em que o Sol se situasse ao Sul, a superfície de captação fosse voltada para o Sul. Outra forma de incremento nos ganhos seria a mudança mensal ou sazonal da inclinação da superfície de captação, já que para cada valor de declinação solar existe um valor de inclinação que faz com que os raios solares incidam de forma mais perpendicular na superfície, com uma análise de qual seria a inclinação que traria maiores ganhos em cada mês ou estação do ano.

Analisando-se os ganhos com o uso do seguimento solar, observando o ganho da superfície inclinada com seguimento sobre a superfície inclinada fixa, pôde-se verificar que este ganho está relacionado a dois principais fatores: a fração difusa da irradiação total,  $k_d$ ; e a época do ano.

Quanto maior for o valor do parâmetro  $k_d$ , a tendência é que maior seja a presença de irradiação difusa na irradiação total, devido a uma maior presença de nuvens no céu, e menor seja o valor da irradiação direta, que é aquela que o seguimento solar pode aumentar a sua captação pela superfície. Com uma menor irradiação direta, menor a margem para ganho possível com o seguimento.

A época do ano também influencia nos ganhos do seguimento, pois nos meses em que a temperatura média é maior, têm-se níveis maiores de irradiação solar incidindo na superfície terrestre e, consequentemente, maior poderá ser o ganho na captação de irradiação com o uso do seguimento solar.

Pode-se verificar a influências desses dois fatores observando a Tab. 2. Nos meses em que a temperatura média é maior na cidade de Fortaleza, de outubro a fevereiro (Wikipédia, 2015), foram observados os maiores valores de ganho com o uso do seguimento, com exceção do mês de janeiro, que apresentou um valor de  $k_d$  bastante elevado, devido às chuvas neste mês, que contribuiu para uma grande redução desse ganho. Nos meses de agosto e setembro, que apresentam valores de temperatura média mais baixos em relação ao período de outubro a fevereiro (Wikipédia, 2015), observou-se um ganho com o seguimento também, devido ao fato do valor de  $k_d$  neste período ser menor em comparação com os demais meses.

A média anual dos ganhos obtidos com o seguimento solar de leste a oeste foi igual a 8,2%, chegando ao valor máximo de 12,7% em média mensal. Este valor foi um pouco acima do obtido por Oliveira (2008), 5,8% na cidade Manaus/AM (latitude:  $-3^\circ$ ), e um pouco abaixo do verificado por Faricelli (2008), 14,2% na cidade de São Paulo/SP (latitude:  $-23,25^\circ$ ).

Esse ganho foi prejudicado devido ao fato do biênio 2003-2004, período da maioria dos meses analisados, ter apresentado um volume de chuvas bem acima da média, sendo aquele com maior volume de chuvas desde o biênio 1988-1989, segundo análise feita por CMI (2014) a partir de dados de FUNCEME (2015).

Conforme verificado por Oliveira (2008), ao se realizar medições de irradiação coletada por uma superfície com seguimento, os ganhos com o seguimento poderão ser ainda maiores que os obtidos com a estimativa, principalmente no começo e ao final do dia.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se uma estimativa, através de uma série de equações, do valor da irradiação solar coletada por uma superfície de captação solar fixa, com determinada inclinação em relação à horizontal, e por outra com a mesma inclinação e com seguimento solar de leste a oeste, ambas na cidade de Fortaleza/CE. Os cálculos foram feitos a partir de valores de irradiação solar global incidentes no plano horizontal coletados por um piranômetro. Foram determinados os ganhos com a inclinação da superfície e com o uso do seguimento na irradiação coletada, ao se comparar as estimativas com valores de irradiação incidentes em uma superfície horizontal no mesmo local ao longo de 12 meses.

Observou-se que os efeitos do fato da superfície de captação estar voltada para o Norte e com uma inclinação de  $15^\circ$  não foram significativos, devido à proximidade da cidade de Fortaleza da Linha do Equador, o que fez com que em determinados meses o ganho com a inclinação da superfície fosse negativo. Poderia se obter ganhos na média anual se fosse feito o ajuste mensal ou sazonal da inclinação para o valor ótimo de cada mês ou estação.

Os ganhos que o uso de seguimento solar proporcionaram foram de 8,2% em média anual, chegando ao valor máximo de 12,7% em média mensal, o que é um valor importante para determinadas aplicações. Esses ganhos podem ser maiores ao se realizar a mesma análise em outros anos, com volume de chuvas mais próximo da média.

Os resultados obtidos demonstram a importância dessa tecnologia de seguimento solar para o aprimoramento da eficiência de um sistema FV, tendo em vista os gastos e a dificuldade que os fabricantes de módulos FV têm para melhorar em uma pequena parcela a eficiência de suas células, e vendo que mesmo em um período bem desfavorável, com um volume de chuvas acima do normal, pôde-se ainda obter um valor de ganho importante na irradiação solar captada pela superfície com seguimento solar.

Isso mostra o grande potencial que o uso de seguimento solar tem, principalmente em países com elevados níveis de irradiação solar, como o Brasil, sabendo que um seguidor solar pode ser desenvolvido com relativa simplicidade e reduzidos custos e pode fornecer ganhos importantes mesmo em condições desfavoráveis.

## REFERÊNCIAS

- CMI – Centro de Mídia Independente. Nunca choveu tão pouco no Ceará como em 2012 e 2013. 2014. Disponível em: <<http://www.midiaindependente.org/pt/blue/2014/01/528371.shtml>>. Acesso em: 29 ago. 2015.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira. 2012. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos\\_23/NT\\_EnergiaSolar\\_2012.pdf](http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2015.
- Faricelli, Christian de Freitas. Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Calendários das chuvas no estado do Ceará. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorol%C3%B3gico/406-chuvas-di%C3%A1rias>>. Acesso em: 29 ago. 2015.
- Maps of World. Brazil Latitude and Longitude Map. Disponível em: <[http://www.mapsofworld.com/lat\\_long/brazil-lat-long.html](http://www.mapsofworld.com/lat_long/brazil-lat-long.html)>. Acesso em: 22 jul. 2015.
- Oliveira, Maurício Madeira. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- Rocha Filho, José Itanor do Couto. Potencial para uso de seguimento solar em sistemas fotovoltaicos: Estudo de caso para Fortaleza/Ce. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Wikipédia. Geografia de Fortaleza. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia\\_de\\_Fortaleza](https://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia_de_Fortaleza)>. Acesso em: 27 ago. 2015.

### ESTIMATED GAIN WITH THE USE OF SOLAR TRACKING FOR FORTALEZA/CE

**Abstract.** *One of the technical restrictions on the dissemination of solar projects is the low efficiency of photovoltaic systems, which promotes a search for alternatives to maximize the use of solar irradiation in these systems. Among these alternatives is the use of solar tracking, which causes the solar capture surface to face the sun, following its movement and thereby capturing more irradiation. Thus, in the present work, using solar irradiation data on the horizontal plane measured by a pyranometer installed at the Alternative Energy Laboratory (LEA) of the Federal University of Ceará (UFC) in Fortaleza/CE, an estimate is made of the irradiation values that would be collected by a fixed surface with a certain inclination to the horizontal and a surface with the same inclination and with solar tracking from east to west, both in the same location. The results show that with the use of solar tracking a gain in solar radiation captured of 8.2% is obtained on annual average, reaching a maximal value of 12.7% on monthly average.*

**Key words:** *Solar Energy, Solar Tracking, Photovoltaic Systems.*