

OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E ORIENTAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES PARA A CIDADE DE PETROLINA

Oliveira, F. T. V. – fernandaatavaress@gmail.com

Gómez-Malagón, L. A. – lagomezma@poli.br

Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco

Resumo. A média anual da radiação solar total diária em superfícies solares inclinadas foi determinada para a cidade de Petrolina (Latitude 09°04'08'' S) utilizando dados radiométricos obtidos através do Projeto SONDA, do Atlas Solarimétrico do Brasil e da base de dados METEONORM. O ângulo de inclinação das superfícies solares foi otimizado visando o melhor aproveitamento da energia solar incidente considerando ajustes mensais, sazonais, anuais e, também, um ângulo de inclinação equivalente à latitude local. A influência da orientação foi estudada utilizando o modelo de Klein e Theilacker. Os valores máximos para a radiação solar foram obtidos para $\gamma=180^\circ$. Além disso, resultados mostram que, devido à baixa latitude de Petrolina, painéis solares devem ser voltados tanto para o Norte quanto para o Sul ao longo do ano para otimizar mensalmente a interceptação da radiação solar total.

Palavras-chave: Ângulo de Inclinação, Radiação Solar, Painéis Solares

1. INTRODUÇÃO

O projeto de sistemas fotovoltaicos fixos inclui a otimização do ângulo de inclinação visando o melhor aproveitamento da radiação solar incidente. Para tal fim, é necessário o estudo da variação da radiação solar total ao longo do ano para se obter o ângulo de inclinação ideal para painéis com ajustes mensais, sazonais ou anuais. Em geral, painéis solares localizados no hemisfério sul interceptam mais radiação solar quando voltados para o norte e vice-versa. No entanto, para regiões de baixa latitude, como é o caso da cidade de Petrolina, foi mostrado que estes podem ser voltados tanto para o norte quanto para o sul ao longo do ano (Ng *et al.*, 2014) (Mousazadeh *et al.*, 2009). Para uma potência de geração fixa, o posicionamento adequado das superfícies solares depende da relação entre o custo associado à estratégia de rastreamento e a economia decorrente da redução do tamanho do sistema fotovoltaico (Kacira *et al.*, 2004). Por outro lado, o valor calculado da radiação incidente nas superfícies solares pode ser diferente dependendo do método utilizado, o qual pode incluir, por exemplo, medições experimentais em estações solarimétricas no local ou em regiões próximas da instalação da planta fotovoltaica, assim como simulações numéricas utilizando dados obtidos por satélites (INPE, 2016) (Tiba, 2001).

No Brasil, a região Nordeste apresenta altos valores de radiação incidente, com potencial de exploração da ordem de 18 MJ/m² diários (Tiba, 2001). No entanto, a localização de uma usina solar requer não somente altos valores de radiação solar, mas também, entre outros requisitos, ter linhas de transmissão próximas para realizar o escoamento da energia gerada. Sendo assim, o município de Petrolina apresenta excelente localização para a construção de uma usina solar devido ao potencial de geração de energia solar e proximidade da usina hidrelétrica de Sobradinho. Desta forma, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) lançou o projeto Planta Fotovoltaica de Petrolina com investimentos da ordem de R\$ 54,3 milhões para a construção de uma planta fotovoltaica para geração de energia elétrica de 3MW, sendo uma de 2,5MW, denominada de Planta Básica, e outra de 0,5MW, chamada de Planta Tecnológica, onde serão realizadas pesquisas (CHESF, 2017). A otimização do ângulo de inclinação para superfícies solares é importante para a melhor exploração do recurso solar (Stanciu e Stanciu, 2014) (Yadav e Chandel, 2011). Neste sentido, este trabalho apresenta os ângulos de inclinação e orientação que maximizam a captação da radiação solar na cidade de Petrolina, que serão calculados a partir de dados solarimétricos de diversas fontes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A média mensal da radiação solar total diária \bar{H}_T em uma superfície inclinada é dada por:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_B + \bar{H}_D + \bar{H}_R \quad (1)$$

Onde \bar{H}_B , \bar{H}_D e \bar{H}_R representam radiação direta, difusa e refletida, respectivamente. Explicitamente, estas componentes da radiação podem ser escritas como (Duffie e Beckman, 2006):

$$\bar{H}_D = \bar{R}_d \bar{H}_d \quad (2)$$

$$\bar{H}_B = (\bar{H} - \bar{H}_d)\bar{R}_b \quad (3)$$

Onde \bar{H} e \bar{H}_d são a média mensal da radiação global e difusa diária em uma superfície horizontal, e \bar{R}_b e \bar{R}_d são as razões entre a radiação diária média mensal direta e difusa em uma superfície inclinada em relação a uma superfície horizontal, respectivamente.

Para uma superfície inclinada localizada no hemisfério sul e voltada para o Equador (ângulo azimutal $\gamma = 180^\circ$), \bar{R}_b é:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi+\beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180)\omega'_s \sin(\phi+\beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (4)$$

Onde β é o ângulo de inclinação como mostrado na Fig. 1, ϕ é a latitude, δ é a declinação, ω_s é a hora angular do pôr do sol ($\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$), ω'_s é a hora angular do pôr do sol para a superfície inclinada e é dada por:

$$\omega'_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta) \end{array} \right. \quad (5)$$

Onde o termo “min” significa o menor dos dois termos entre parênteses. A declinação pode ser determinada por:

$$\delta = 23,45 \sin[360(284 + n)/365] \quad (6)$$

Onde n é o dia médio de cada mês (Kalogirou, 2009).

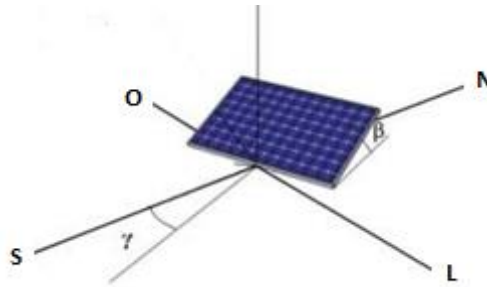


Figura 1 – Ângulos de posicionamento de uma superfície solar

Os métodos para estimar o valor do fator \bar{R}_d são classificados como isotrópicos ou anisotrópicos. Os modelos isotrópicos são aqueles que consideram que a intensidade de radiação difusa no céu é uniforme. Já os modelos anisotrópicos, consideram a radiação difusa na região ao redor do sol e uma componente de radiação difusa uniforme no restante do céu (Noorian *et al.*, 2008). Em particular, o método de Liu e Jordan já foi utilizado devido a sua simplicidade, e por estimar satisfatoriamente a radiação solar total em superfícies voltadas para o norte (Gopinathan, 1990). Desta forma, o fator \bar{R}_d , determinado por Liu e Jordan, é (Liu e Jordan, 1961):

$$\bar{R}_d = \frac{[1+\cos \beta]}{2} \quad (7)$$

Considerando a refletância difusa ρ da radiação solar total para os arredores, a radiação refletida na superfície inclinada é:

$$\bar{H}_R = \bar{H}\rho \left(\frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (8)$$

Então, a radiação total em uma superfície inclinada de acordo com o modelo de Liu e Jordan é:

$$\bar{H}_T = (\bar{H} - \bar{H}_d)\bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1+\cos \beta}{2} \right) + \bar{H}\rho \left(\frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

Através desta equação, a dependência da radiação solar total em relação ao ângulo de inclinação pode ser calculada através dos valores disponíveis de radiações diárias global e difusa.

Por outro lado, a influência da orientação, que é dada pelo ângulo azimutal γ , é descrita pelo modelo de Klein e Theilacker (Klein e Theilacker, 1981). Para $\gamma \neq 0$ (ou 180°), o nascer e o pôr do sol para a componente direta da radiação em uma superfície inclinada pode ser diferente em relação às componentes de radiação difusa e refletida. Neste caso, a média mensal da radiação total diária é dada por:

$$\bar{H}_T = \bar{H}D + \bar{H}_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \bar{H}\rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (10)$$

Onde

$$D = \begin{cases} \text{máx}[0, G(\omega_{SS}, \omega_{SR})] & \text{se } \omega_{SS} \geq \omega_{SR} \\ \text{máx}[0, [G(\omega_{SS}, -\omega_S) + G(\omega_S, \omega_{SR})]] & \text{se } \omega_{SS} < \omega_{SR} \end{cases} \quad (11)$$

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2d} \left\{ \left(\frac{bA}{2} - a'B \right) (\omega_1, \omega_2) \frac{\pi}{180} + (a'A - bB)(\text{sen } \omega_1 - \text{sen } \omega_2) - a'C(\cos \omega_1 - \cos \omega_2) + \frac{bA}{2}(\text{sen } \omega_1 \cos \omega_1 - \text{sen } \omega_2 \cos \omega_2) + \frac{bC}{2}(\text{sen}^2 \omega_1 - \text{sen}^2 \omega_2) \right\} \quad (12)$$

Com

$$a = 0,409 + 0,5016 \text{ sen}(\omega_s - 60) \quad (13)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \text{ sen}(\omega_s - 60) \quad (14)$$

$$a' = a - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \quad (15)$$

$$d = \text{sen } \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s \quad (16)$$

$$A = \cos \beta + \tan \phi \cos \gamma \text{ sen } \beta \quad (17)$$

$$B = \cos \omega_s \cos \beta + \tan \delta \text{ sen } \beta \cos \gamma \quad (18)$$

$$C = \frac{\text{sen } \beta \text{ sen } \gamma}{\cos \phi} \quad (19)$$

E *máx* significa o maior valor entre os dois valores entre parênteses, ω_{sr} e ω_{ss} são a hora angular do nascer e do pôr do sol, respectivamente. Dependendo da orientação do painel solar, os sinais de ω_{sr} e ω_{ss} são dados por:

$$|\omega_{sr}| = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \\ \omega_{sr} = \begin{cases} -|\omega_{sr}| & \text{se } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ or } (A \geq B) \\ +|\omega_{sr}| & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (20)$$

$$|\omega_{ss}| = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \\ \omega_{ss} = \begin{cases} +|\omega_{ss}| & \text{se } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ or } (A \geq B) \\ -|\omega_{ss}| & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (21)$$

Para calcular o valor de radiação a partir da Eq. (9) foram empregados os valores das medições das radiações diárias global e difusa foram obtidas através da estação solarimétrica em Petrolina no Projeto SONDA (INPE, 2016), e do Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2001).

No primeiro caso, a média mensal diária foi a média dos valores de cada hora para cada mês desde 2009 até 2014. A radiação solar total foi calculada utilizando as Eq. (1) a (9), variando ângulos de inclinação de -30° a 60° para cada mês utilizando os softwares Microsoft Excel e Origin. A partir dos resultados foi obtido o ângulo de inclinação que permite otimização na interceptação da radiação considerando ajustes mensais, sazonais, anuais e, também, um ângulo de inclinação equivalente à latitude local.

No segundo caso, foram empregados os valores calculados de \bar{H} e \bar{H}_d obtidos através do Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2001) e do modelo de Erbs (Erbs *et al.*, 1982). Neste caso, a média mensal da radiação diária foi calculada através da equação de Angstrom:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{N} \quad (22)$$

Onde \bar{H}_0 é a radiação extraterrestre em uma superfície horizontal em MJ/m^2 , \bar{N} é a duração média em horas de um dia de um determinado mês, a e b são constantes empíricas e \bar{n} é a média mensal do número de horas com luz solar disponível durante o dia (Tiba, 2001). Já a componente difusa da radiação mensal foi calculada utilizando a equação de Erbs (Erbs *et al.*, 1982):

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,82\bar{K}_T^3 \quad \text{para } \omega_s > 81,4^\circ \text{ e } 0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8 \quad (23)$$

Onde $\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0$. Sabendo os valores de \bar{H} e \bar{H}_d e considerando o modelo de Liu e Jordan (Liu e Jordan, 1961) para a radiação difusa, o cálculo de \bar{H}_T foi realizado de acordo com a Eq. (9) para os diferentes valores do ângulo de inclinação.

Por outro lado, o cálculo do ângulo de inclinação que otimiza a captação da radiação solar também foi realizado usando o software PVsyst, o qual utiliza a base de dados meteorológicos METEONORM e o modelo de Perez, para o cálculo da radiação em superfícies inclinadas.

Finalmente, a dependência da média mensal da radiação total diária em relação aos ângulos azimutal e de inclinação foi calculada utilizando o modelo de Klein e Theilacker (Klein e Theilacker, 1981) considerando os valores experimentais de \bar{H} e \bar{H}_d obtidos através do Projeto SONDA. Um programa desenvolvido no MATLAB ajudou a resolver as Eq. (10) a (21) variando o ângulo de inclinação de -30° a 60° e o ângulo azimutal de 90° a 270° .

3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Os resultados experimentais obtidos através do Projeto SONDA para as médias mensais das radiações global e difusa diárias são mostrados na Fig. 2.

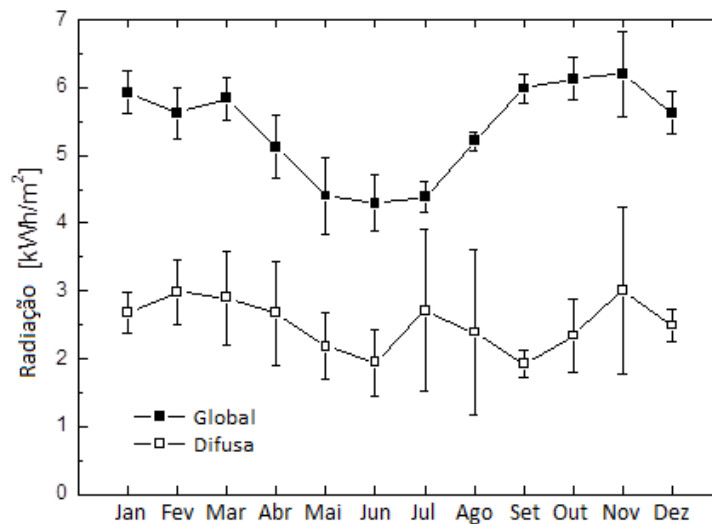


Figura 2 – Média mensal da radiação diária.

A margem de erro foi determinada a partir do desvio padrão das medidas analisadas no período de 2009 a 2014.

Através da Fig. 2, pode ser visto que a radiação global em Petrolina permanece uniforme durante a primavera (setembro – dezembro) e o verão (dezembro – março), tendo valor aproximado de $6 \text{ kWh}/m^2$, e diminui para aproximadamente $4,5 \text{ kWh}/m^2$ durante a transição do outono (março – junho) para o inverno (junho – setembro). A radiação difusa apresenta aproximadamente o mesmo comportamento.

Com os dados anteriores, a dependência da média mensal da radiação total diária em relação ao ângulo de inclinação foi calculada usando Eq. (9) e o resultado é mostrado na Fig. 3.

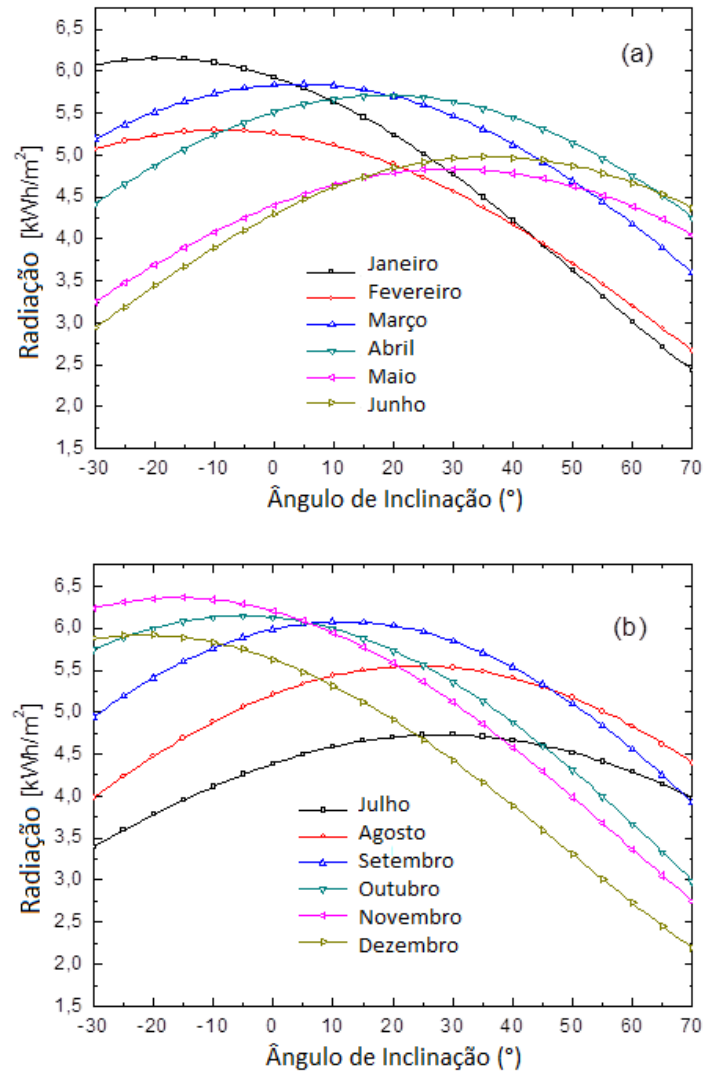
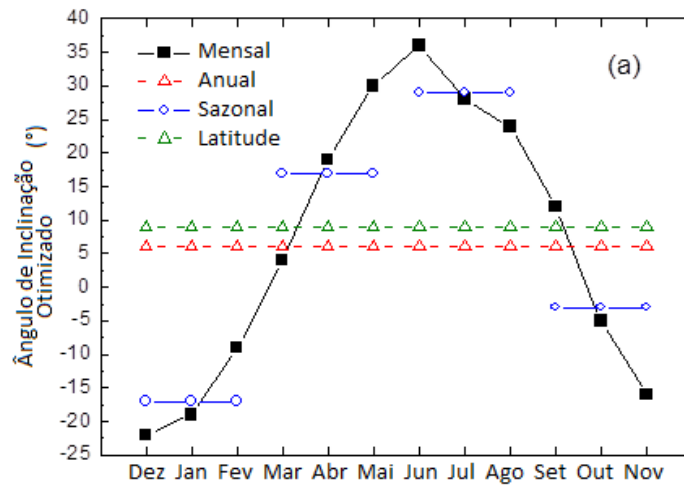


Figura 3 – Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação de (a) janeiro a junho, e (b) de julho a dezembro.

A partir destes resultados foram determinados a radiação total e os ângulos de inclinação que permitem maior captação de energia considerando ajustes mensais, anuais e sazonais. Por comparação, os resultados com o ângulo de inclinação igual à latitude são mostrados na Fig. 4 e na Tab. 1.



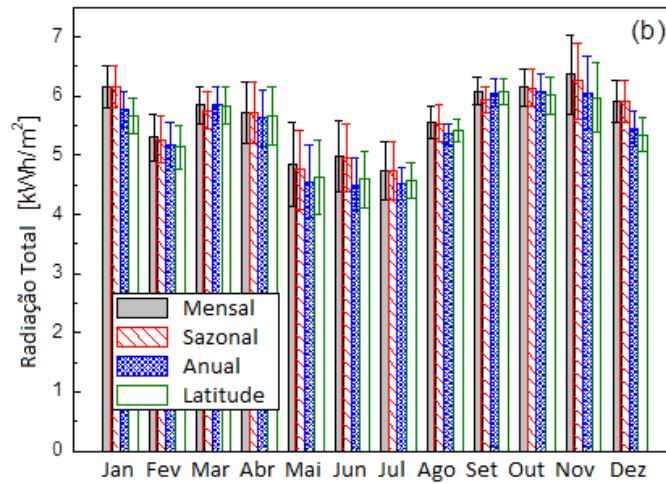


Figura 4 – (a) Distribuição mensal dos ângulos de inclinação otimizados e (b) a média mensal da radiação total diária para ajustes mensal, anual, sazonal e para o ângulo de inclinação igual à latitude.

Tabela 1– Média mensal da radiação total diária para superfícies solares inclinadas com otimização mensal, anual, sazonal e equivalente à latitude local. Cálculos realizados utilizando dados do Projeto SONDA (esquerda), Atlas Solarimétrico (meio) e PVsyst (direita).

Mês	Mensal						Anual					
	Ângulo [°]			Radiação [kWh/m²]			Ângulo [°]			Radiação [kWh/m²]		
Jan	-19	-20	-20	6,15	6,18	6,23	6	8	8	5,76	5,67	5,68
Fev	-9	-9	-9	5,30	6,20	5,44	6	8	8	5,19	6,00	5,29
Mar	4	5	7	5,84	5,80	5,71	6	8	8	5,84	5,80	5,71
Abr	19	21	23	5,71	5,58	5,36	6	8	8	5,62	5,47	5,22
Mai	30	33	33	4,83	5,37	4,88	6	8	8	4,56	5,01	4,53
Jun	36	38	38	4,98	5,42	4,83	6	8	8	4,50	4,87	4,35
Jul	28	36	36	4,73	5,54	5,04	6	8	8	4,52	5,04	4,60
Ago	24	27	28	5,55	5,53	5,83	6	8	8	5,35	5,31	5,53
Set	12	13	14	6,08	5,82	6,14	6	8	8	6,05	5,80	6,11
Out	-5	-3	-3	6,14	6,32	5,99	6	8	8	6,06	6,23	5,93
Nov	-16	-17	-17	6,36	6,45	6,83	6	8	8	6,06	6,03	6,36
Dez	-22	-22	-22	5,91	6,34	6,00	6	8	8	5,45	5,71	5,45
Média				5,63	5,88	5,69				5,41	5,58	5,40

Mês	Sazonal						Latitude					
	Ângulo [°]			Radiação [kWh/m ²]			Ângulo [°]			Radiação [kWh/m ²]		
Jan	-17	-18	-18	6,15	6,18	5,92	9	9	9	5,66	5,64	5,64
Fev	-17	-18	-18	5,26	6,14	5,39	9	9	9	5,14	5,97	5,28
Mar	17	19	20	5,75	5,68	5,61	9	9	9	5,83	5,79	5,71
Abr	17	19	20	5,71	5,57	5,35	9	9	9	5,66	5,49	5,24
Mai	17	19	20	4,75	5,26	4,78	9	9	9	4,62	5,04	4,56
Jun	29	35	34	4,95	5,42	4,83	9	9	9	4,59	4,90	4,38
Jul	29	35	34	4,73	5,54	5,04	9	9	9	4,57	5,08	4,64
Ago	29	35	34	5,53	5,49	5,81	9	9	9	5,41	5,33	5,56
Set	-3	-3	-4	5,93	5,66	5,99	9	9	9	6,07	5,81	6,12
Out	-3	-3	-4	6,14	6,32	5,98	9	9	9	6,01	6,21	5,91
Nov	-3	-3	-4	6,25	6,32	6,58	9	9	9	5,97	5,99	6,32
Dez	-17	-18	-18	5,90	6,33	5,70	9	9	9	5,34	5,67	5,41
Média				5,59	5,82	5,64				5,41	5,57	5,40

Dos resultados obtidos utilizando dados do Projeto SONDA, foi observado que o melhor ângulo de inclinação para um ajuste mensal variou de -22° a 36° ao longo dos 12 meses do ano. Devido à proximidade com o Equador, valores mostram que durante 7 meses os painéis devem ser voltados para o norte. No entanto, durante 5 meses, o ângulo de inclinação ideal mostrou-se voltado para o sul. O ângulo de inclinação anual que permite melhor aproveitamento da energia solar é 6° . Para ajustes sazonais, o ângulo de inclinação ideal para a cidade de Petrolina mostrou-se -3° durante a primavera, -17° durante o verão, 17° durante o outono e 29° durante o inverno.

O valor máximo de radiação total diária se apresenta para painéis com ajustes mensais, seguido por painéis com ajustes sazonais, anuais e valor do ângulo de inclinação equivalente à latitude local. Comparando os valores de radiação calculados com os dados do projeto Sonda e os resultados de \bar{H} e \bar{H}_d obtidos através das Eq. (22) e (23), foram observadas variações máximas no ângulo de inclinação de 8° no ajuste mensal para o mês de julho, e de 2° para o ajuste anual. Para ângulos de inclinação sazonais, as variações foram de 1° no verão, 2° no outono, 6° no inverno e não houve variação na primavera. Por outro lado, os ângulos de inclinação encontrados através do uso do software PVsyst são mais próximos dos determinados usando os valores de \bar{H} e \bar{H}_d calculados através das Eq. (22) e (23). Diferenças máximas de 2° foram encontradas no mês de abril para otimização mensal, 1° para ajuste sazonal e nenhuma diferença para ajuste anual.

De acordo com os valores experimentais de \bar{H} e \bar{H}_d , a média anual de radiação total diária é mostrada na Fig. 5.

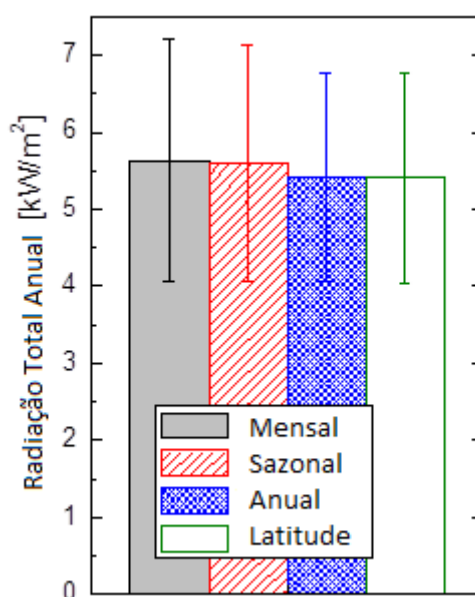


Figura 5 – Média anual da radiação total diária calculada usando dados do Projeto SONDA.

De acordo com a Fig. 5, a radiação total obtida durante o ano para painéis com ajustes sazonais, anuais e com o ângulo igual à latitude mostrou-se, quando comparada a painéis com ajustes mensais, inferior em 0,7%, 3,9% e 3,9%, respectivamente. Por outro lado, os valores calculados de \bar{H} e \bar{H}_d mostraram-se inferior em relação a painéis com ajustes mensais em 1%, 5,1% e 5,3%. Por fim, valores obtidos através do PVsyst mostraram-se inferior em 0,9%, 5,1% e 5,1% quando comparados à radiação anual total obtida através de ângulos de inclinação mensais.

A relação entre o ângulo azimutal, o ângulo de inclinação e a radiação total diária média mensal é mostrada na Fig. 6.

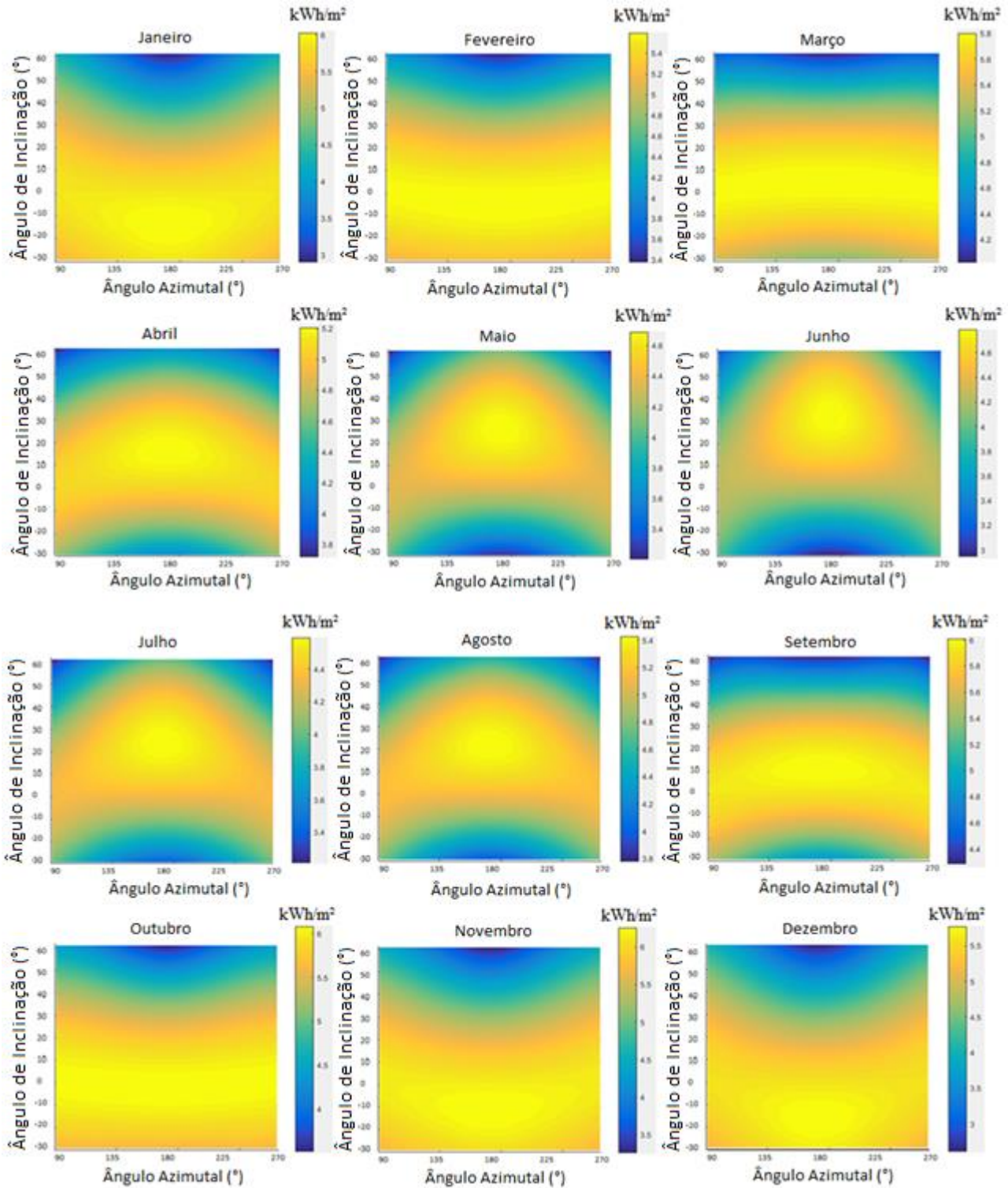


Figura 6 – Dependência da média mensal da radiação total diária em relação ao ângulo azimutal e de inclinação.

Variações no ângulo de inclinação e azimutal que permitem perdas de até 1% na média mensal da radiação total diária são mostradas na Tab. 2.

Tabela 2 – Ângulo de inclinação, ângulo azimutal e média mensal da radiação solar total diária determinados usando o modelo de Klein e Theilacker (Klein e Theilacker, 1981). Entre colchetes está o intervalo em que o ângulo pode variar para ter uma perda de radiação menor do que 1%.

Mês	Mensal			Anual		
	Ângulo de Inclinação [°]	Ângulo Azimutal [°]	Radiação [kWh/m ²]	Ângulo de Inclinação [°]	Ângulo Azimutal [°]	Radiação [kWh/m ²]
Jan	-15 [-24,-6]	180 ± 38	6,02	5 [-5,15]	180 ± 90	5,76
Fev	-6 [-16,4]	180 ± 90	5,60	5 [-5,15]	180 ± 90	5,53
Mar	4 [-5,13]	180 ± 90	5,80	5 [-5,15]	180 ± 90	5,80
Abr	15 [6,25]	180 ± 39	5,20	5 [-5,15]	180 ± 68	5,14
Mai	25 [16,35]	180 ± 22	4,69	5 [-5,15]	180 ± 50	4,48
Jun	31 [22,40]	180 ± 19	4,79	5 [-5,15]	180 ± 43	4,41
Jul	23 [13,33]	180 ± 26	4,59	5 [-5,15]	180 ± 56	4,44
Ago	21 [12,30]	180 ± 27	5,43	5 [-5,15]	180 ± 56	5,27
Set	10 [1,19]	180 ± 58	6,01	5 [-5,15]	180 ± 81	5,99
Out	-4 [-13,6]	180 ± 90	6,08	5 [-5,15]	180 ± 90	6,03
Nov	-12 [-22,-3]	180 ± 48	6,25	5 [-5,15]	180 ± 90	6,05
Dez	-17 [-26,-8]	180 ± 32	5,77	5 [-5,15]	180 ± 90	5,46
Média			5,52			5,36

Mês	Sazonal			Latitude		
	Ângulo de Inclinação [°]	Ângulo Azimutal [°]	Radiação [kWh/m ²]	Ângulo de Inclinação [°]	Ângulo Azimutal [°]	Radiação [kWh/m ²]
Jan	-13[-22,-4]	180 ± 41	6,02	9[-5,15]	180 ± 90	5,65
Fev	-13[-22,-4]	180 ± 75	5,57	9[-5,15]	180 ± 90	5,47
Mar	14[5,24]	180 ± 90	5,74	9[-5,15]	180 ± 90	5,78
Abr	14[5,24]	180 ± 41	5,20	9[-5,15]	180 ± 50	5,18
Mai	14[5,24]	180 ± 30	4,62	9[-5,15]	180 ± 41	4,55
Jun	25[16,34]	180 ± 20	4,76	9[-5,15]	180 ± 32	4,51
Jul	25[16,34]	180 ± 25	4,58	9[-5,15]	180 ± 41	4,50
Ago	25[16,34]	180 ± 25	5,41	9[-5,15]	180 ± 42	5,34
Set	-2[-10,7]	180 ± 90	5,90	9[-5,15]	180 ± 61	6,01
Out	-2[-10,7]	180 ± 90	6,08	9[-5,15]	180 ± 90	5,97
Nov	-2[-10,7]	180 ± 90	6,18	9[-5,15]	180 ± 90	5,95
Dez	-13[-22,-4]	180 ± 37	5,76	9[-5,15]	180 ± 90	5,34
Média			5,48			5,35

Os resultados da Fig. 6 e Tab. 2 mostram que o valor máximo da média mensal da radiação total diária é obtido quando a superfície solar é alinhada ao eixo N-S com ângulos de inclinação que podem ser positivos ou negativos dependendo do mês. Considerando perdas menores do que 1% na radiação total no ajuste mensal, sazonal e anual, os ângulos de inclinação e azimutal podem variar aproximadamente 10° e 90°, respectivamente.

Por outro lado, a comparação entre os valores calculados do ângulo de inclinação, usando o modelo de Klein e Theilacker e a partir dos dados do Projeto Sonda considerando superfícies orientadas para o norte, mostra concordância no sinal (positivo/negativo) para o ajuste mensal e variações no valor de até 5°. Para o ajuste sazonal, a variação do ângulo foi de 4°, e para o ajuste anual foi de 1°.

4. CONCLUSÕES

Quatro diferentes metodologias foram apresentadas para obtenção do ângulo de inclinação que permite melhor aproveitamento da radiação solar na cidade de Petrolina, uma vez que esta cidade apresenta grande potencial para instalação de plantas solares. As primeiras três metodologias consideraram o ângulo azimutal fixo ($\gamma = 180^\circ$), e empregaram dados solarimétricos de três fontes: Projeto SONDA, Atlas Solarimétrico do Brasil e a base de dados METEONORM do software PVsyst. A última metodologia empregada permitiu calcular a dependência da radiação total mensal em função dos ângulos de inclinação e azimutal. Os valores calculados dos ângulos de inclinação variaram em 5° para o ajuste mensal, 4° para o ajuste sazonal e 1° para o ajuste anual.

Para ângulos de inclinação otimizados mensalmente, a radiação total anual coletada é superior em relação a ângulos de inclinação otimizados sazonalmente e anualmente. Superfícies com ângulo de inclinação anual e com ângulo de

inclinação equivalente à latitude local apresentam praticamente a mesma radiação anual total. Também foram observadas perdas na radiação total coletada, em relação à radiação coletada otimizando o ângulo de inclinação mensalmente, de 1% para o ajuste sazonal e 4% para o ajuste anual. Este resultado sugere que ângulos de inclinação sazonais possam ser preferidos em relação a ângulos com ajustes mensais. A escolha final do método de ajuste do melhor ângulo de inclinação deve ser feita considerando os custos para serem realizados os ajustes e a economia devido à redução do tamanho da planta solar, assim como considerações técnicas associadas à manutenção. Neste caso, ângulos de inclinação maiores do que 10° são sugeridos para evitar a formação de camadas de poeira que absorvem parte da radiação incidente.

Agradecimentos

Agradecemos o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI – UPE).

REFERÊNCIAS

- Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, 2017. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br/_layouts/15/chesf_noticias_farm/noticia.aspx?idnoticia=190>. Acesso em: 16 Setembro 2017.
- Tiba, C., 2001. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. UFPE.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Erbs, D. G., Klein, S. A., Duffie, J. A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Solar Energy, vol. 28, n. 4, pp. 293–302.
- Gopinathan, K. K., 1990. Solar radiation on inclined surfaces. Solar Energy, vol. 45, n. 1, pp. 19–25.
- INPE. (n.d.). Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/> Acessado em: 1 Janeiro 2016.
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S., 2004. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. Renewable Energy, vol. 29, n.8, pp. 1265–1275.
- Kalogirou, S., 2009. Solar Energy Engineering : Processes and Systems, Academic Press.
- Klein, S. A., Theilacker, J. C., 1981. An Algorithm for Calculating Monthly-Average Radiation on Inclined Surfaces. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 103, n. 1, pp 29.
- Liu, B., Jordan, R., 1961. Daily insolation on surfaces tilted towards equator. Trans. ASHRAE, vol. 10, pp. 53–59.
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., Sharifi, A., 2009. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, n.8, pp. 1800–1818.
- Ng, K. M., Adam, N. M., Inayatullah, O., Kadir, M. Z. A. A., 2014. Assessment of solar radiation on diversely oriented surfaces and optimum tilts for solar absorbers in Malaysian tropical latitude. International Journal of Energy and Environmental Engineering, vol. 5, n. 1, pp. 75.
- Noorian, A. M., Moradi, I., Kamali, G. A., 2008. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. Renewable Energy, vol. 33, n. 6, pp. 1406–1412.
- Stanciu, C., Stanciu, D., 2014. Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. Energy Conversion and Management, vol. 81, pp. 133–143.
- Yadav, A. K., Chandel, S. S., 2013. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 23, pp. 503–513.

OPTIMUM TILT ANGLE AND ORIENTATION OF SOLAR SURFACES IN PETROLINA CITY

Abstract. *The annual average of daily total solar radiation at inclined surfaces in Petrolina City (latitude 09° 04' 08" S) was determined and compared using radiometric data from SONDA project, the Brazilian Solarimetric Atlas and the METEONORM data. The tilt angle was optimized monthly, seasonally and yearly, and also equal to the local latitude and compared. The influence of the orientation was studied using the Klein and Theilacker model. The maximum values of the solar radiation were obtained for $\gamma = 180^\circ$. Furthermore, the results showed that, due to the low latitude of the city, the sun tilts to both southern and northern skies of the site to monthly optimize the total solar radiation collection throughout the year.*

Key words: *Tilt Angle, Solar Radiation, Solar Panels.*