

ANÁLISE HISTÓRICA DA IRRADIAÇÃO GLOBAL NO MUNICÍPIO DE ILHÉUS/BA

Adriano Hoth Cerqueira – hoth@uesc.br

Universidade Estadual de Santa Cruz - Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas

Ronaldo Lima Gomes – rlgomes@uesc.br

Universidade Estadual de Santa Cruz – Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais

Resumo: Os dados para a irradiação solar global, disponibilizados pela Estação Automática de Coleta de Dados (PCD) operada pelo Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA), foram utilizados para obter sua série histórica para o caso particular do município de Ilhéus, Bahia, no período compreendido entre os anos de 2001 a 2016. Com isto, obtivemos valores diários para a irradiação global incidente em uma superfície horizontal, H_{HOR} , e comparamos estes valores com o esperado para o topo da atmosfera, $H_{HOR,0}$. Com estes dois parâmetros calculamos o índice de claridade, K_T , e mostramos o comportamento praticamente constante do seu valor médio ao longo de um ano para o município de Ilhéus, a despeito da grande dispersão (diária) encontrada para este índice. Em particular, mostramos que o índice de claridade diário médio para Ilhéus, neste período, é de $K_T = 0.46 \pm 0.13$. Ao analisar a distribuição de K_T usando os chamados filtros de Iqbal, mostramos que, de fato, Ilhéus possui majoritariamente dias que são parcialmente cobertos com nuvens. Ao se estudar a distribuição do índice de claridade com a época do ano, mostramos que esta tendência persiste. Propomos também a existência de uma correlação entre os índices de claridade obtidos para superfícies horizontal e inclinada, o que pode contribuir para previsão de geração de energia em unidades de microgeração fotovoltaicas em regiões onde existem determinações de K_T .

Palavras-chave: Radiação Global – Índice de Claridade – Ilhéus

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma rede de estações espalhadas pelo seu território com o objetivo de se obter informações meteorológicas tais como precipitação, temperatura (mínima e máxima), velocidade e direção dos ventos, umidade relativa do ar, pressão barométrica etc, mas que também coletam informações sobre a irradiância solar que chega em solo. Algumas poucas estações - notadamente, aquelas pertencentes à rede SONDA - armazenam as componentes direta e difusa da irradiância, pois contam com pireliômetros e radiômetros. Já as Estações Automáticas de Coleta de Dados (ou PCD's) que fazem parte do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados, e são operadas pelo Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA; Martins e Pereira, 2011), armazenam e disponibilizam os dados integrados em intervalos de 3 horas da irradiância solar global apenas¹.

Tanto os dados das PCD's quanto aqueles oriundos da rede SONDA são frequentemente utilizados para validação de modelos mais gerais de transferência radiativa, os quais fazem previsões locais para a irradiação global (ou total, no caso de se incluir o albedo, importante para superfícies inclinadas) que chega em solo. Estes dados obtidos em solo são chamados algumas vezes de *verdades terrestres* (e.g., Ceballos *et al* 2004). Os modelos de transferência radiativa são, por sua vez, usados para estimar a irradiância (e suas componentes) em locais onde não existem coleta e/ou medida de dados em solo. Embora a interpolação de valores obtidos a partir de estações distantes entre si seja uma metodologia frequentemente empregada para se obter estimativas desta mesma grandeza, há ganhos substanciais no uso dos modelos de transferência radiativa quando a distância entre as estações supera 50 km (Perez *et al* 1997, Martins e Pereira 2011). De qualquer forma, é imprescindível o conhecimento das grandezas medidas diretamente em solo da irradiância solar e suas distintas componentes. A importância do conhecimento preciso dos dados de irradiância solar para um determinado local fica ainda mais evidente quando se quer, por exemplo, estimar o potencial de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos (e.g., Kumar e Umanand, 2005).

O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos. Todo o território nacional encontra-se no chamado cinturão solar, região compreendida entre as latitudes +/- 35° do globo terrestre. Neste contexto, estimativas realistas sobre o potencial de geração de energia dependem do conhecimento da energia disponível na radiação solar.

1 Adotaremos aqui a terminologia definida na norma ABNT 10899 e usaremos o símbolo H_{HOR} para a irradiação global diária (isto é, a irradiância integrada em 24 horas), e definiremos como H_{3-HOR} como sendo a irradiação para um período de 3 horas; que é a variável que a PCD nos fornece. Atribuiremos os símbolos $H_{HOR,0}$ e $H_{3-HOR,0}$ para a irradiação integrada em 24 horas e a integrada em 3 horas, respectivamente, no topo da atmosfera.

Neste trabalho nós usaremos os dados da irradiação global, H_{3-HOR} , fornecidos pela PCD localizada em Ilhéus no período de 2001 a 2016, para obter o valor diário da irradiação global H_{HOR} . Apresentaremos distribuições sazonais deste parâmetro e contrastaremos com a irradiação calculada para o topo da atmosfera ($H_{HOR,0}$). Calculamos o índice de claridade diário, $K_T = H_{HOR}/H_{HOR,0}$, e apresentamos distribuições deste índice para distintas épocas do ano.

2. BASE E TRATAMENTO INICIAL DOS DADOS

A PCD de Ilhéus (PCD de número 32499 do Sistema Integrado de Bases Ambientais, ou SINDA) localiza-se na latitude -14.754 e longitude -39.226, a uma altitude de 68 metros. Seu piranômetro, modelo LI-COR LI200S-L (que utiliza um sensor fotovoltaico e não térmico), é projetado para medir a irradiância global incidente em uma superfície plana em intervalos de 10 segundos, possui alta linearidade ($\sim 1\%$ para irradiância $< 3 \text{ kW/m}^2$) e baixa sensibilidade à variação de temperatura.

Os dados para a irradiação global são disponibilizados² em MJ/m^2 a cada 3 horas. Assim, para cada dia, temos 8 valores disponíveis para esta variável, sendo a soma de todos os valores a irradiação global diária. Embora as PCD's disponibilizem os dados em MJ/m^2 , todos os resultados aqui apresentados estarão em kWh/m^2 . As estações PCD's possuem hora padrão universal GMT (*Greenwich Mean Time*; ou Horário Médio de Greenwich).

Foram utilizados os dados disponíveis para os anos de 2001 a 2016. Antes e após este período a PCD de Ilhéus não fornece os dados para a irradiação global. No período em questão, também há lacunas e/ou descontinuidade nos dados. Em particular, os seguintes anos possuem dados incompletos: 2004 (há dados apenas até 21 de junho), 2005 (dados iniciam-se em 02 de fevereiro; e são interrompidos em 14 de fevereiro, e voltam a ser apresentados a partir do dia 04 de abril), 2006 (não há dados entre os dias 17 e 20 de novembro, e entre os dias 12 e 17 de dezembro) 2013 (há uma interrupção de 22 a 25 de dezembro), 2013 (há dados apenas para janeiro, 1 em fevereiro e 2 dias em dezembro), 2014 (não há dados até o dia 07 de fevereiro e, além disso, não há dados também entre os dias 09 e 18 de setembro), 2015 (dados incompletos no início de setembro, e faltam dados no final de novembro, e início de dezembro), 2016 (dados até 15 de outubro). Além destes lapsos no fornecimento dos dados para irradiação, houve dias específicos que apresentaram ausência de um ou mais valores para a irradiação. Nós isolamos e identificamos estas interrupções nas leituras, mesmo que tenha ocorrido em uma única medida para um determinado dia. A Tab. 1 mostra a porcentagem de pontos com leitura fornecida pela PCD, em função do ano. Na média, dispusemos de $\sim 86\%$ de toda a base de dados com medidas disponíveis.

Há outros casos, contudo, que merecem uma maior atenção. Em particular, há dias em que a irradiação atingiu valor superior à irradiação esperada para o topo da atmosfera. Há anos em que as medidas estão claramente em desacordo com a hora apresentada pela Tabela 1 (caso dos anos de 2002 e 2014). Tanto em um caso como no outro, o parâmetro que utilizaremos para eliminar e/ou ajustar os pontos na nossa amostra será o índice de claridade, que depende de um modelo para ser obtido. Assim, o critério de exclusão de pontos da nossa amostra agora passa a ser físico, e dependente de modelo. Na próxima seção mostraremos como obtivemos a irradiação no topo da atmosfera e como, de fato, a utilizamos para excluir outros pontos da nossa amostra.

Tabela 1: Porcentagem dos dados disponíveis em função do ano para a PCD de Ilhéus/BA.

Ano	% dos dados com leitura disponível	Ano	% dos dados com leitura disponível
2001	98,46	2009	98,12
2002	99,47	2010	99,73
2003	99,86	2011	99,62
2004	46,88	2012	98,73
2005	75,65	2013	7,91
2006	97,29	2014	85,14
2007	99,79	2015	94,96
2008	99,93	2016	77,70

3. MODELO NUMÉRICO PARA O CÁLCULO DA IRRADIAÇÃO NO TOPO DA ATMOSFERA – ÍNDICE DE CLARIDADE COMO CRITÉRIO DE CONTROLE DA AMOSTRA

Para calcularmos a irradiação que chega no topo da atmosfera, usaremos a prescrição comumente empregada (Iqbal, 1983), mas que descreveremos sucintamente a seguir. A irradiância solar que chega no topo da atmosfera (em uma superfície horizontal) é dada por:

² Os dados podem ser encontrados neste endereço: <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/index.php>

$$G_{HOR,0} = G_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (1)$$

onde $G_0 = 1366,1 \text{ W/m}^2$ é o valor da constante solar por nós adotado. Na Eq. (1), o termo $(r_0/r)^2$ é uma correção devido à elipticidade da órbita terrestre, e é dado por (novamente, maiores detalhes podem ser vistos em Iqbal, 1983; uma implementação menos rigorosa por ser vista em Myers, 2003):

$$\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma, \quad (2)$$

onde Γ é o *ângulo do dia*, que representa o deslocamento angular diário da Terra em sua órbita em torno do sol (em 1 de Janeiro, $\Gamma = 0$). Em radianos:

$$\Gamma = 2\pi (d_n - 1)/365, \quad (3)$$

e d_n é o dia em consideração, e varia de 1 a 365 (não consideraremos aqui os anos bissextos; ou, de outra forma, os anos bissextos serão considerados como anos normais, de 365 dias; excluindo-se o dia 29 de fevereiro). Assim, com as equações (1), (2) e (3), obtemos a irradiância no topo da atmosfera. Se não houvesse atmosfera, a irradiância que chegaria em uma superfície horizontal no solo seria dada pela Eq. (1) mas levando-se em consideração também a distância zenital do Sol:

$$G_{HOR} = G_{HOR,0} \cos(\theta_z) = G_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos(\theta_z). \quad (4)$$

Na Eq. (4), $\cos(\theta_z)$ é dado por:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega), \quad (5)$$

onde δ é a declinação do Sol, φ é a latitude do local e ω o ângulo horário. Nos nossos modelos, o ângulo horário correspondente à hora do nascer do sol é determinado pela Eq. (5) acima, quando $\cos(\theta_z) = 0$ (ou $\theta_z = -90^\circ$). Logo:

$$\omega_{SR} = \cos^{-1}(-\tan(\delta) \tan(\varphi)). \quad (6)$$

Para superfícies inclinadas de um ângulo s com relação à horizontal, e voltadas para uma direção qualquer que faça um ângulo com a direção norte (azimute) igual a γ , as equações (4) e (5) se modificam (mas não o cálculo do ângulo horário na Eq. 6; apenas modifica o ângulo de incidência da radiação que chega à superfície inclinada):

$$G_{INC} = G_{HOR,0} \cos(\theta) = G_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos(\theta) \quad (7a)$$

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(s) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(s) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(s) \sin(\gamma) \sin(\omega) \quad (7b)$$

Assumindo primeiramente que o dia seja simétrico (com relação ao zênite), pode-se calcular a duração do dia, para cada dia do ano:

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(\delta) \tan(\varphi)), \quad (8)$$

(sendo o fator $2/15$ oriundo do fato de que a duração do dia é dada por $2\omega_{SR}$, que, convertido em horas, nos fornece $(2/15)\omega_{SR}$). A duração do dia foi corrigida também levando-se em conta a refração atmosférica (correção de $0,64^\circ$; ver Schaefer e Liller 1990) e a dimensão do diâmetro solar (correção de $0,27^\circ$; ver Funari e Tarifa 2017). Em horas, estas correções totalizam $\delta t = 0,122 \text{ h}$, ou $\delta\omega_{SR} \sim 109^\circ$. O único parâmetro que nos falta para a descrição completa do problema é a declinação do Sol (e.g., Iqbal, 1983):

$$\delta = (a_0 + a_1 \cos(\Gamma) + b_1 \sin(\Gamma) + a_2 \cos(2\Gamma) + b_2 \sin(2\Gamma) + a_3 \cos(3\Gamma) + b_3 \sin(3\Gamma)) \frac{180}{\pi}. \quad (9)$$

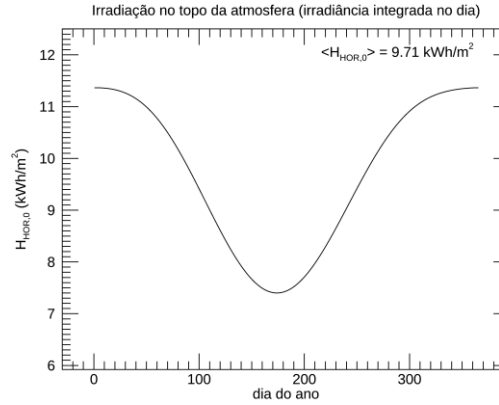


Figura 1: Irradiação esperada para o topo da atmosfera, em função dos dias do ano, d_n (1 = 01 de Janeiro, 365 = 31 de Dezembro). Os valores da irradiação estão em kWh/m^2 . O valor médio obtido para um ano é de $\langle H_{HOR,0} \rangle = 9,71 \text{ kWh/m}^2$.

As constantes desta equação são dadas por: $a_0 = 0,006918$, $a_1 = -0,399912$, $a_2 = -0,006758$, $a_3 = -0,002697$, $b_1 = 0,070257$, $b_2 = 0,000907$, $b_3 = 0,00148$.

A irradiação diária esperada para o topo da atmosfera é obtida integrando-se a Eq. (4) de $\omega_{\text{nasc}} = -(\omega_{\text{SR}} + \delta\omega_{\text{SR}})$ até $\omega_{\text{ocaso}} = +(\omega_{\text{SR}} + \delta\omega_{\text{SR}})$, já que, para nós, o ângulo horário do nascer do sol é idêntico, mas com sinal trocado, ao ângulo horário do ocaso solar. Como os dados da estação onde coletamos a irradiação estão distribuídos em intervalos de 3 horas, dividimos o dia de modo a uniformizar a amostragem. No nosso modelo, definimos a irradiação global no topo da atmosfera, para um dado intervalo $\Delta\omega = \omega_f - \omega_i$ (em ângulo horário), como:

$$H_{HOR,0} = \int_{\omega_i}^{\omega_f} G_{HOR,0} d\omega. \quad (10)$$

Finalmente, deve-se fazer uma correção da hora aparente local (ou hora solar) pela distância, em longitude, da PCD de Ilhéus para o meridiano central a 45° de longitude. Esta correção é de 0.39 horas e deve ser subtraída da hora aparente local para efetivamente obtermos a hora padrão local. Assim podemos efetivamente comparar com os dados da estação PCD, cujos horários de coleta estão em hora padrão de Greenwich (isto é, GMT). Além disso, há também uma correção (de no máximo 16 minutos; e que varia ao longo do ano) devido à excentricidade da órbita da Terra e obliquidade do eixo de rotação, e suas influências na determinação da hora solar (ou hora local). A chamada “equação do tempo”, descrita tanto em Iqbal (1983) quanto em Myers (2003), é responsável por fazer esta correção. A Fig. 1 mostra o resultado obtido para a irradiação diária para o topo da atmosfera. O valor médio anual esperado para a irradiação diária no topo da atmosfera, para a longitude e latitude consideradas, é de $\langle H_{HOR,0} \rangle = 9,71 \text{ kWh/m}^2$.

Os valores da irradiação no topo da atmosfera servem para nós como um valor limite para o observado em solo. De fato, como parte da radiação solar é refletida no topo da atmosfera, espera-se que apenas uma fração da mesma atinja o solo. Por outro lado, esperamos medidas diferente de zero ao longo do dia, no intervalo compreendido entre o nascer e o ocaso do Sol. Assim, podemos usar este critério físico para excluir e/ou rejeitar dados da nossa amostra, em ambos os extremos, isto é, rejeitar valores nulos de medidas quando esperamos alguma irradiação e/ou valores superiores ao esperado para o intervalo em questão. Assim, podemos definir dois critérios objetivos para remoção de dados da amostra original:

$$\text{se } H_{3-HOR} = 0 \text{ quando } H_{3-HV,0} \neq 0 \quad (11a)$$

onde $H_{3-HOR,0}$ é a irradiação no topo da atmosfera integrada no mesmo período de tempo daquele fornecido pela estação PCD. Um segundo critério é baseado no índice de claridade (e.g., Liu e Jordan, 1960, 1963):

$$\text{se } K_{T3} = \frac{H_{3-HOR}}{H_{3-HOR,0}} \geq 0,7 \quad (11b)$$

A aplicação do primeiro critério (Eq. 11a) exclui aproximadamente 8,83% dos pontos da amostra, enquanto a aplicação do segundo critério (Eq. 11b) remove aproximadamente 1,76% de todos os pontos da amostra. Na Tab. 2 mostramos o impacto efetivo de cada critério para cada ano em particular. Para cada critério (Eq. 11a ou Eq. 11b), apresentamos a quantidade de pontos (em porcentagem do valor total) excluídos da amostra (ver Tab. 2).

Tabela 2: Porcentagem dos dados removidos em cada ano após aplicação dos critérios físicos para rejeição de dados da amostra (ver texto para detalhes).

Ano	% removido Eq. 10a	% removido Eq. 10b	Ano	% removido Eq. 10a	% removido Eq. 10b
2001	10,14	3,15	2009	10,21	1,06
2002	9,76	2,26	2010	10,27	5,17
2003	9,11	2,16	2011	10,27	1,47
2004	6,71	0,34	2012	9,45	0,92
2005	6,61	1,78	2013	1,84	1,68
2006	10,17	1,16	2014	7,33	0,17
2007	9,52	2,10	2015	9,11	0,51
2008	11,92	3,94	2016	8,93	0,21

4. DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DO ÍNDICE DE CLARIDADE

Na seção anterior definimos o índice de claridade para um período de 3 horas, de modo a utilizá-lo como critério de exclusão de dados experimentais da amostra inicial. Aqui, estaremos interessados no índice de claridade diário, definido pela seguinte equação (e.g., Liu e Jordan 1963):

$$K_T = \frac{H_{HOR}}{H_{HOR,0}} \quad (12)$$

isto é, a razão entre as irradiações em solo quando comparada àquela calculada no topo da atmosfera.

A Fig. 2 mostra a distribuição histórica (isto é, toda a base de dados, excluídos aqueles pontos cujos critérios foram definidos nas seções prévias) do índice de claridade diário para Ilhéus. O valor médio e o desvio (calculado como a raiz quadrada da variância) encontrado para K_T foi:

$$K_T > 0,46 \pm 0,13 \quad (12)$$

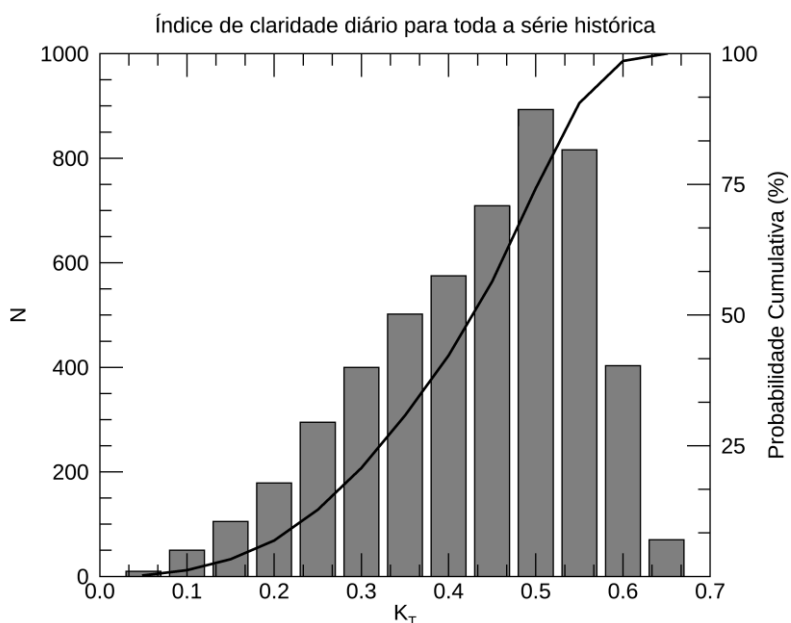


Figura 2: Distribuição do índice de claridade para todos os dados disponíveis e validados na amostra. À esquerda, apresentamos o número de dias com medidas válidas e, no eixo x, o valor do índice de claridade. Superposto com o histograma apresentamos a frequência acumulada (em %), cujo eixo está à direita no gráfico.

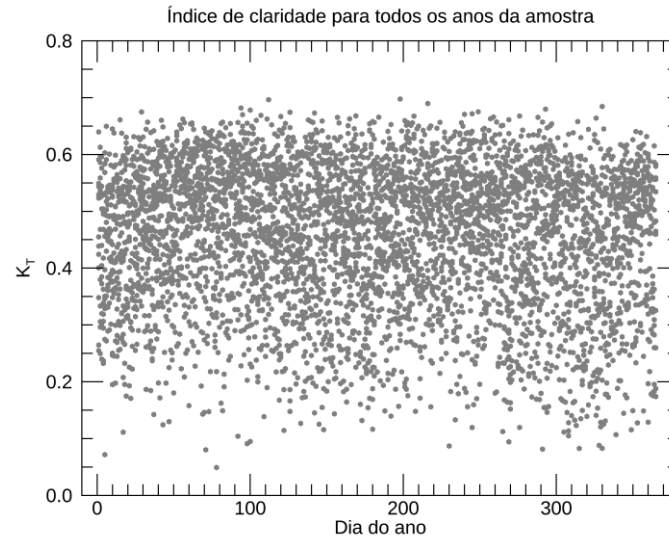


Figura 3: Valores do índice de claridade para cada dia do ano, para todos os anos da amostra (2001-2016). Os pontos que não satisfizeram aos critérios estabelecidos pelas Eq. (11a) e (11b) (ver o texto para maiores detalhes) foram excluídos do gráfico.

Como dissemos, alguns pontos da amostra possuem $K_T > 0,7$. É bastante provável que uma parcela destes pontos seja real, e uma parcela seja devido a medidas equivocadas. Contudo, como não temos um mecanismo confiável para extraí-los da amostra e como a presença dos mesmos não altera o valor médio do índice de claridade, excluímos artificialmente os pontos com $K_T > 0,7$. A inclusão dos mesmos na amostra, contudo, não altera o valor obtido pela Eq. (12) acima. Usaremos o valor do índice de claridade médio, na próxima seção, para obter uma função de irradiação (média) esperada para Ilhéus, e compará-la com os valores médios medidos em solo.

Na Fig. 3 temos a distribuição de todos os pontos da nossa amostra validada, isto, é, os pontos que sobreviveram aos critérios acima mencionados. Com relação aos pontos com $K_T > 0,7$, e que foram excluídos da amostra, percebe-se que a densidade de pontos diminui drasticamente após um limiar de 0,65; o que explica o fato de que com ou sem a exclusão destes pontos, a média obtida fica inalterada.

A distribuição sazonal do índice de claridade pode ser vista na Fig. 4. Nesta figura, temos a distribuição dos índices de claridade por época do ano, aqui definida da seguinte forma: verão, de 21 de dezembro a 20 de março; outono, de 21 de março a 20 de junho; inverno, de 21 de junho a 20 de setembro; primavera, de 21 de setembro a 20 de dezembro. Embora a distribuição varie um pouco em sua forma, é surpreendente que o índice de claridade tenha praticamente a mesma característica independentemente da estação: um pico em aproximadamente $\langle K_T \rangle \sim 0,50$ e uma assimetria privilegiando valores mais baixos de K_T 's independentemente da época do ano. Com efeito, um cálculo do *skewness* das distribuições nos fornecem valores negativos para todas elas, sendo os valores encontrados os seguintes: $S_{\text{verão}} = -0,67$, $S_{\text{outono}} = -0,57$, $S_{\text{inverno}} = -0,55$ e $S_{\text{primavera}} = -0,51$. Os valores médios para o índice de claridade em função da estação do ano, para a base de dados analisada, são os seguintes: $\langle K_T \rangle_{\text{verão}} = 0,47 \pm 0,21$, $\langle K_T \rangle_{\text{outono}} = 0,47 \pm 0,18$, $\langle K_T \rangle_{\text{inverno}} = 0,46 \pm 0,21$, $\langle K_T \rangle_{\text{primavera}} = 0,44 \pm 0,23$.

Uma análise interessante que poderia ser feita é a dependência do índice de claridade com a massa de ar (ou o cosseno do ângulo zenital), e a investigação da presença eventual de uma distribuição bimodal, refletindo um céu coberto com nuvens (baixos K_T 's) e um céu claro (altos K_T 's) em ambos os extremos da distribuição (e.g., Assunção *et al* 2007). Entretanto, nossa base de dados baseia-se em intervalos de 3 horas, o que elimina qualquer possibilidade de acessarmos esta questão.

O valor médio do índice de claridade (Eq. 12) permite-nos obter uma curva média da irradiação esperada em solo. Na Fig. 5 apresentamos (linha tracejada) esta estimativa para $H_{\text{HOR}}(\text{teórica}) = H_{\text{HOR},0} \langle K_T \rangle$. Na mesma figura, comparamos esta curva com os valores médios mensais para a irradiação medida pela PCD/Ilhéus (linha cheia).

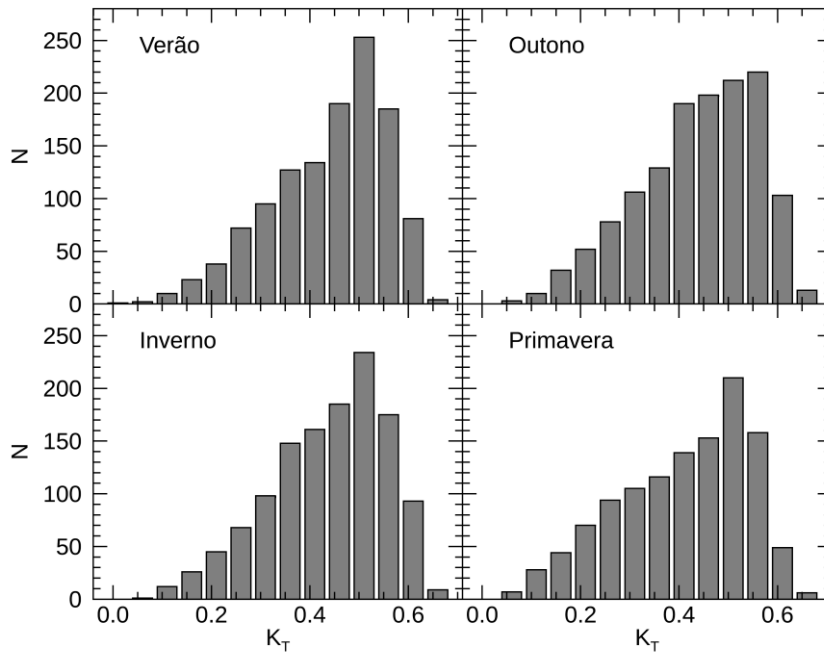


Figura 4: Distribuição do índice de claridade para diferentes estações do ano, considerando todo o intervalo temporal analisado (2001-2016).

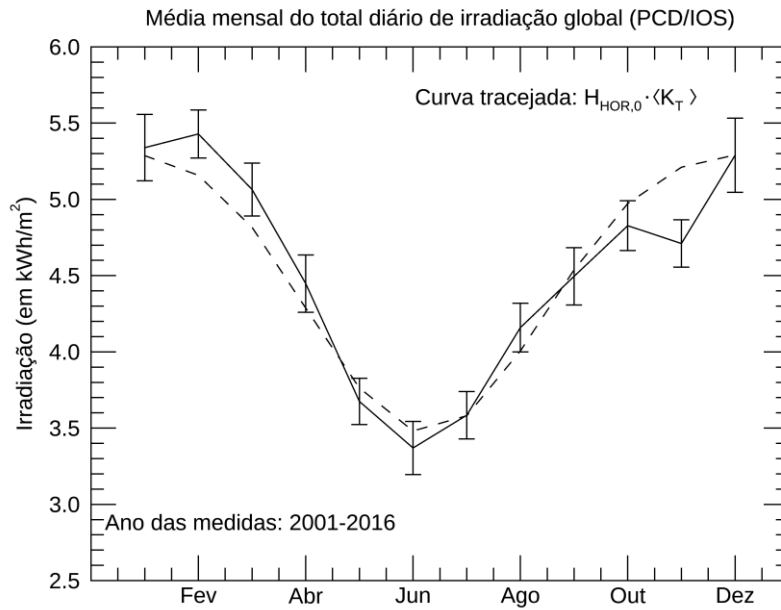


Figura 5: Média mensal do total diário de irradiação global obtida na estação de Ilhéus (curva preta). As barras verticais apresentam os desvios padrão em torno do valor médio para cada mês. O valor médio da irradiação global que atinge o solo em Ilhéus, obtido a partir dos dados da PCD, é de $\langle H_{HOR} \rangle = 4,53 \pm 0,76 \text{ kW/m}^2$. Também apresentamos a curva teórica (linha tracejada) obtida a partir do produto entre a irradiação no topo da atmosfera e o valor médio do índice de claridade (ver Eq. 12).

Tendo em vista a simplicidade do modelo, é surpreendente a semelhança entre as curvas obtidas da Fig. 5. Ainda com relação à distribuição temporal do índice de claridade, apresentamos sua evolução ao longo do ano, a partir de valores médios mensais dos valores diários. Na Fig. 6 mostramos o comportamento dos valores médios mensais para o

índice de claridade diário, bem como a dispersão (i.e., desvio padrão) em torno destes valores médios (barras verticais). Um ajuste linear foi feito para os pontos (médios), e a função obtida foi a seguinte (linha tracejada na Fig. 6):

$$K_T(i) = 0,488 - 0,003 \cdot i \quad (13)$$

onde $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ é a variável que representa o mês do ano (1 = janeiro, 2 = fevereiro, 3 = março, 4 = abril, 5 = maio, 6 = junho, 7 = julho, 8 = agosto, 9 = setembro, 10 = outubro, 11 = novembro, 12 = dezembro). O coeficiente de correlação Pearson encontrado foi de $R^2 = 0.60$, o que indica uma correlação moderada. Embora certamente seja possível ajustar curvas mais aproximadas da distribuição dos pontos, o fato de K_T variar pouco ao longo do ano nos permite usar, em princípio, até mesmo um valor constante para fazer previsões, por exemplo, para a geração de energia elétrica média, esperada no longo prazo, a partir de painéis fotovoltaicos. Em função do dia do ano ($d_n = 1$ para 1º de Janeiro, e $d_n = 365$ para 31 de Dezembro), a equação que obtemos é a seguinte:

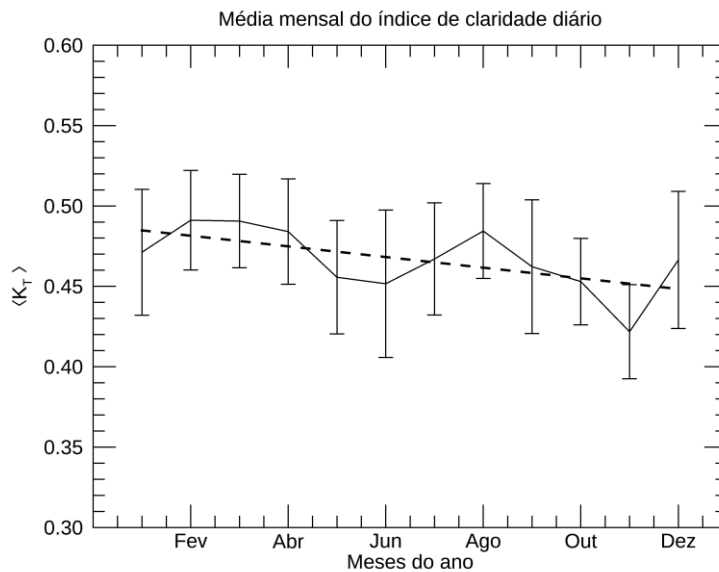


Figura 6: Média mensal do valor diário do índice de claridade para os diferentes meses do ano, considerando todo o intervalo analisado (2001-2016). Também apresentamos um ajuste linear (linha tracejada) para os dados.

$$K_T(d_n) = 0,47302 - 0,00009 \cdot d_n \quad (14)$$

onde consideramos, aqui, a média diária para o índice de claridade (em detrimento da média diária mensal).

5 CONCLUSÕES

Analizamos os dados da Plataforma de Coleta de Dados (ou PCD), pertencente ao Sistema Brasileiro de Coleta de Dados, situada em Ilhéus, Bahia, no período compreendido entre 2001 e 2016. Após uma filtragem inicial da amostra, retivemos os dados que julgamos serem confiáveis e portanto passíveis de serem utilizados. Obtivemos um valor médio para a irradiação global que chega no solo de $\langle H_{HOR} \rangle = (4,53 \pm 0,76)$ kW/m²/dia (ver Fig. 5). Calculamos também o índice de claridade diário, o seu valor médio para cada dia do ano, e um valor médio para cada mês do ano. Este último apresenta um comportamento bastante estável ao longo do ano (se considerada a série histórica). Encontramos um valor médio mensal para o valor do índice de claridade diário de $\langle K_T \rangle = 0,46 \pm 0,13$. Conforme mostramos, a irradiação disponível no topo da atmosfera tem um valor médio (anual) de $\langle H_{TOA} \rangle = 9,71$ kWh/m²/dia (ver Fig. 1). Assim, degradamos este valor usando $\langle K_T \rangle$ e obtivemos uma curva média para a irradiação em solo que é bastante semelhante à curva observada. Este fato mostra que o índice de claridade médio precisa ser aproximadamente constante ao longo do ano; do contrário, não seria possível observar a concordância (excetuando-se alguns pontos; notadamente, no fim do ano; ver Figuras 5 e 6) entre a curva média de irradiação calculada (linha tracejada na Fig. 5) e medida (linha cheia na Fig. 5) a partir dos dados disponíveis na PCD de Ilhéus.

Outra conclusão que obtemos ao analisar os dados é que, se utilizarmos os chamados filtros de Iqbal ($0.7 < K_T < 0.9$ para dias claros; $0.3 < K_T < 0.7$ para dias parcialmente cobertos com nuvens e $0 < K_T < 0.3$ para dias cobertos com nuvens; ver Ianetz et al 2007), concluímos a partir dos dados da PCD que Ilhéus possui dias majoritariamente parcialmente encobertos com nuvens, e de forma pouco dependente da época do ano. É claro que a análise aqui feita é

bastante aproximada, pois usamos dados integrados a cada 3 horas. Seria necessário medidas com frequência bastante superiores para podermos separar populações distintas de índices de claridade, por época do ano e/ou em função (por exemplo) da massa de ar (e/ou distância zenital) observada.

Em um artigo recente (Gomes e Cerqueira, 2019), propusemos a existência de uma correlação entre a irradiação global, inferida a partir de um sistema de placas fotovoltaicas instaladas em uma unidade microgeradora no município de Ilhéus, e a irradiação global que incide sobre um plano horizontal (obtida no presente trabalho, e extraídas da estação PCD em Ilhéus). Mostramos em Gomes e Cerqueira (2019) que:

$$P = eH_{INC} = aH_{HOR} + b \quad (15)$$

onde P é a produção diária média da unidade microgeradora (em kWh/m²), e é a eficiência do sistema fotovoltaico, H_{INC} é a irradiação global que chega no sistema de placas da unidade microgeradora, por m², por dia (ou seja, a energia, em kWh/m²/dia). As constantes a e b devem ser ajustadas em função da irradiação global na superfície horizontal; inferidas, por exemplo, a partir dos dados de uma estação PCD, como fizemos aqui neste trabalho. Esta equação pode ser manipulada para obtermos uma equação que correlaciona os índices de claridade para as superfícies planas e inclinadas:

$$K_{INC} = a_{INC}K_T + b_{INC} \quad (16)$$

onde os coeficientes lineares e angulares da expressão são, respectivamente:

$$a_{INC} = \frac{a H_{HOR,0}}{e H_{INC,0}} \quad (17)$$

$$b_{INC} = \frac{b}{e} H_{INC,0} \quad (18)$$

Os valores de referência (isto é, sem a presença da atmosfera, mas com inclinações de placas e orientações com relação ao norte quaisquer), $H_{HOR,0}$ e $H_{INC,0}$ podem ser calculados através da metodologia já conhecida (Myers, 2012; Iqbal 1983; ver também seção 3 acima). A eficiência de um sistema fotovoltaico pode ser também estimada. Já a obtenção da correlação proposta na Eq (15) depende de medições independentes da radiação global na superfície horizontal. Assim, se admitirmos a existência de uma correlação entre H_{INC} e H_{HOR} para uma determinada localidade e geometria do sistema (como mostramos em Autor 2 e Autor 1, 2018), propomos que o índice de claridade para a superfície inclinada em questão pode ser inferido (Eq. 16), auxiliando assim no cálculo de estimativas de produção de energia elétrica por uma unidade microgeradora em particular.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o relatório elaborado pela arbitragem, que contribuiu para a melhoria da apresentação do texto final, e também à Universidade Estadual de Santa Cruz, pelo financiamento e apoio para execução desta pesquisa. A.H.C. gostaria de agradecer à Professora Maria Jaqueline Vasconcelos pelo suporte com a programação em IDL.

BIBLIOGRAFIA

- Assunção, H.F., Escobedo, J.F., Oliveira, A.P. 2007, A new algorithm to estimate sky condition based on 5 minutes-averaged values of clearness index and relative optical air mass. In: **Theoretical and Applied Climatology**, V. 90, pp. 235-248
- Ceballos, J.C., Bottino, M.J., de Souza, J.M. 2004, A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. In: **Journal of Geophysical Research**, V. 109
- Funari, F.L., Tarifa, J.R. 2017, Sunshine, Global Radiation and Net Radiation in Brazil. In: **Revista do Instituto Geológico**, V. 38(2), pp. 49-83
- Gomes, R.L., Cerqueira, A.H. 2019, Aspectos da microgeração, consumo e produção de energia elétrica fotovoltaica: estudo de caso em uma residência no Sul da Bahia, In: **Revista Brasileira de Energia Solar (no prelo)**
- Ianetz, A., Lyubansky, V., Setter, I., Kriheli, B., Evseev, E.G., Kudish, A.I. 2007, Inter-comparison of different models for estimating clear sky solar global radiation for the Negev region of Israel. In: **Energy Conversion & Management**, V. 48, pp. 259-268
- Iqbal, M. 1983, In: **An Introduction to Solar Radiation**, Academic Press
- Kumar, R., Umanand, L. 2005, Estimation of global radiation using clearness index model for sizing photovoltaic system. In: **Renewable Energy**, V. 30, pp. 2221-2233
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. 1960, The interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. In: **Solar Energy**, V. 4 (3), pp 1-19

- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. 1963, A rational procedure for predicting the long term average performance of flat-plate solar-energy collectors. In: **Solar Energy**, V. 7 (2), pp 53-74
- Martins, F.R., Pereira, E. B. 2011, Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. In: **Revista Brasileira de Geofísica**, V. 29 (2), pp 265-276
- Myers D R. 2013. Practical modeling for renewable energy applications. **Solar Radiation**; CRC Press.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., DE Abreu, S.L. E Ruther, R. 2006, in **Altas Brasileiro de Energia Solar**, INPE.
- Perez, R., Sealz, R., Zelenka, A. 1997, Comparing Satellite Remote and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data, in **Solar Energy**, V 60(2), 89
- Schaefer, B.E., Liller, W. 1990, Refraction Near the Horizon, in **Publication of Astronomical Society of the Pacific**, V 102, pp. 796-805

HISTORICAL ANALYSIS OF AVAILABLE IRRADIATION DATABASE FOR ILHÉUS/BA

Abstract: *The available data for global solar irradiation, taken from the “Plataforma de Coleta de Dados (PCD)” operated by the “Sistema Integrado de Dados Ambientais” (SINDA), was used to build a historical dataset for the particular case of the city of Ilhéus, in Bahia, in the years between 2001 and 2016. We have obtained daily values for the global irradiation on a horizontal surface, H_{HOR} , and compared them with the expected value for the top of the atmosphere, $H_{HOR,0}$. In that way, we have calculated and analyzed the clearness index for each day, K_T . We find an almost constant clearness index of $K_T = 0.46 \pm 0.13$. Applying the so-called Iqbal filters, we conclude that the clearness index is mostly concentrated in small values (compared with the mean), indicating the predominance of partially cloudy days. This trend of an almost constant value for the clearness index persists no matter the actual season in the year. We propose also a correlation between the clearness indexes for a horizontal surface and a given inclined surface. Such a correlation may help to obtain better predictions for future photovoltaic plant installation, in regions where a K_T determination is already available.*

Keywords: Global irradiation – clearness index – Ilhéus