ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 19, pp11.01-11.12, 2015. Impreso en la Argentina
ISSN 2314-1433 - Trabajo selecionado de Actas ASADES2015

EQUACIONAMENTO SIMPLIFICADO PARA A ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA ANUAL EM PLANO INCLINADO JUNTO AO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA NO BRASIL

Í. A. G. Ríspoli [1], M. G. Montaute [2] J. L. F. Cassuci [3]
Centro Universitário Adventista de São Paulo – Campus Engenheiro Coelho
Web site institucional: <http://unasp-ec.edu.br/site/>
Estrada Municipal Pr. Walter Boger, S/N – Bairro Lagoa Bonita – Engenheiro Coelho – SP
Caixa Postal: 11 CEP. 13165-000 – Telefone: (55-19) 3858 – 9000
E-mail: italo.gatica@gmail.com

Recibido 01/09/15, aceptado 02/10/15

RESUMO: Uma metodologia de dimensionamento simplificado condizente aos exaustivos roteiros de Duffie e Beckman (2006) e Liu e Jordan (1960) para delinear a irradiação solar em plano inclinado na superfície terrestre sobre condições isotrópicas se faz essencial para a propagação da tecnologia termossolar. Logo, a proposta deste trabalho é produzir um equacionamento baseando-se na latitude e no coeficiente de claridade atmosférico local para estimar a irradiação absorvida pelos coletores solares fixados a uma inclinação de 17° em relação ao plano horizontal, comumente empregado nas coberturas com telhas cerâmicas de 30% de inclinação. Igualmente, compara-se o resultado desta nova formulação com o apresentado pelo aplicativo computacional Radiasol V1, determinando a área coletora solar através das duas ferramentas, de acordo com a norma brasileira NBR 15569:2008, comprovando a eficácia do procedimento simplificado para situações de desvios azimutais de até 45° em relação ao Norte Verdadeiro para volumes de reserva de até 5000 litros.

Palavras Chaves: Equacionamento Simplificado; Irradiação Solar sobre Plano Inclinado na Superfície Terrestre; Dimensionamento Solar; Desvio Azimutal.

INTRODUÇÃO

Dentre as mais diversas fontes de energia renovável, enfatiza-se a energia termossolar como um recurso de baixo impacto socioambiental, não produtor de excedentes e viável economicamente frente a radiação incidente sobre todo o planeta Terra, remetendo-nos o quão importante é seu potencial para a inserção complementar da matriz energética através de instalações de sistemas de aquecedores solares. Para tanto, torna-se necessário o uso de metodologias de dimensionamento perspicazes, principalmente para a obtenção da irradiação em plano inclinado na superfície terrestre (H_T), ante a insuficiente base informativa cedida pela vigente norma brasileira de projeto e instalação de sistemas em circuito direto, NBR 15569:2008 que sugere a consulta de outros recursos para a especificação deste dado primordial para o dimensionamento eficiente. Com isso, faz-se do objetivo desta pesquisa a elaboração e posterior aferição de um procedimento de cálculo simplificado para quantificar H_T em situações delimitadas de inclinação de 17° em relação ao plano horizontal e desvios azimutais de até 90° para leste ou para oeste – que condiz a situações frequentes na implantação de placas coletoras solares. Para tanto, neste estudo emprega-se referências bibliográficas conceituadas, bancos de dados, ferramentas computacionais e gráficas, além da norma técnica NBR 15568:2008.

---

[1] Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, docente da graduação dos cursos de Engenharia Civil no Centro Universitário Adventista de São Paulo – Campus Engenheiro Coelho e do Centro Universitário Salesiano de São Paulo – Unidade Americana.

[2] Aluna regular da graduação em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Adventista de São Paulo.

[3] Engenheiro Ambiental pela Faculdade Municipal Professor Franco Montoro FMPFM, Mogi Guaçu, SP, Brasil.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os modelos de mensuração da radiação solar foram elaborados para fornecer a quantia incidente acumulada ou instantânea, sendo denominados como irradiação ou irradiância, respectivamente. Partindo-se da irradiância extraterrestre (I_o), Duffie e Beckman (2006) descrevem o equacionamento em W/m² como sendo:

$$I_o = 1367 \left(1+0{,}033 \cos \left(\frac{360\ n}{365{,}24} \right) \right) (\cos\delta \ \cos\omega \cos\phi + \operatorname{sen}\delta \ \operatorname{sen} \phi) \tag{1}$$

$$\omega = 15° (h-12) \tag{2}$$

$$\delta = 23{,}45° \ \operatorname{sen} \left(\frac{360° \ (n+284)}{365{,}24} \right) \tag{3}$$

No qual, "ϕ" é a latitude local em graus, com valores negativos para qualquer ponto do Hemisfério Sul; "ω" é ângulo horário correspondente ao deslocamento angular do Sol em consequência da rotação da Terra na velocidade de 15°/hora, admitindo-se "h" como a hora solar em estudo e "δ" a declinação solar dependente da posição física do planeta Terra na elíptica dada em graus, com "n" correspondente ao ordinal entre 1 e 365 apropriado a data em que se almeja aferir a declinação solar.

Por outro lado, a radiação solar acumulada no topo da atmosfera sobre um plano horizontal teórico (H_o) em um dia completo depende, além das variáveis já conhecidas, do ângulo horário do anoitecer (ω_s) calculado pela Equação (5), que alocado em (4), quantifica a irradiação extraterrestre em Wh/m².

$$H_o = \frac{24}{\pi} 1367 \left(1+0{,}033 \cos \left(\frac{360\ n}{365{,}24} \right) \right) \left(\cos \phi \cos\delta \ \operatorname{sen}\omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180°} \operatorname{sen}\phi \ \operatorname{sen}\delta \right)$$

$$H_o = \int_{\text{horário solar do amanhecer}}^{\text{horário solar do anoitecer}} I_o (h) dh \tag{4}$$

$$\omega_s = \operatorname{arco\,cos} (-\operatorname{tg}\phi \ \operatorname{tg}\delta) \tag{5}$$

Porém, o dimensionamento da área coletora solar depende da quantidade de irradiação solar que chega sobre a placa normalmente inclinada sobre uma determinada orientação com relação ao eixo Norte-Sul, que diverge de H_o por admitir de acordo com Melania *et al* (2005) que a radiação solar ao propagar-se da atmosfera até a superfície terrestre, sofre o fenômeno espalhamento que origina as componentes direta e difusa, ocorrendo também a absorção. Logo, pode-se determinar a radiação em superfície terrestre através do uso de equipamentos específicos que requerem um investimento inicial, bem como um profissional tecnicamente habilitado, para cada local de interesse investigatório ou ainda por meio de formulações empíricas como as desenvolvidas através do modelo de Angström (1924), que de acordo com Gordon (2001) trata-se de uma expressão matemática que relaciona o coeficiente empírico, que pode ser chamado de índice de claridade atmosférica ou coeficiente de transmitância atmosférica (K_t), interpretada a partir do quociente entre a irradiação solar global diária média em superfície horizontal terrestre ($\overline{H}$) e a irradiação solar diária média no topo da atmosfera ($\overline{H_o}$), lembrando que a dedução de grande parte das séries históricas de K_t partem da regressão linear também implícita na Equação (6) ao empregar o Heliógrafo de Cambell-Stokes na medição diária das horas de duração do brilho solar "n" aqui adaptada para "s" com a finalidade única de não confundir a mesma nomenclatura com as citadas nas Equações (1), (3) e (4).

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H_o}} = a + b \left(\frac{s}{N} \right) = \overline{K_t} \tag{6}$$

Da qual, “a” e “b” são coeficientes empíricos inerentes à natureza e às características locais, correspondendo respectivamente ao coeficiente linear e angular de regressão nas medições heliográficas que observam a duração do brilho solar “s” com relação à duração teórica do dia solar “N” no quociente “s/N” como eixo das abscissas e K_t no eixo das ordenadas, sendo “N” facilmente obtido através da Equação (7).

$$N = \frac{2\omega_s}{15} + 0{,}1 \qquad (7)$$

Quando não existirem informações suficientes sobre os coeficientes empíricos “a” e “b” estes podem ser estimados razoavelmente de acordo com Glover, Mc Cullosh, conforme citado por Ríspoli (2008) pelos procedimentos dispostos em (8).

$$a = 0{,}29 \cos\phi \qquad \text{e} \qquad b = 0{,}52 \qquad (8)$$

O valor médio mensal de K_t, também depende da climatologia local, pois em latitudes tropicais de frequentes precipitações pluviométricas, como em grande parte do litoral brasileiro registram-se valores próximos e até inferiores a 0,50 como médias mensais. Ríspoli (2008) aponta uma forte tendência do valor de 0,50 representar o Brasil de Norte a Sul de acordo com as fontes apresentadas pelo banco de dados Radiasol V1.

A irradiação solar que chega num plano inclinado orientado num eixo Norte-Sul é designada por H_T ou H_β e seu valor numérico depende inicialmente de H, e por consequência de desvios azimutais do plano inclinado, que compõem um elevado número de operações aritméticas e exaustivos cálculos trigonométricos com a adoção de vários modelos de distribuição temporal e espacial da radiação solar, além da consideração de isotropia e anisotropia da abóbada celeste junto à dedução da fração difusa da irradiação solar (H_d).

Logo, Liu e Jordan (1960) estabelecem o cálculo de H_β para céu isotrópico, que conforme citado por Oliveira (1997) corresponde à soma da componente direta – que ao ser emitida pelo Sol atinge a superfície terrestre sem desvios, além da componente difusa compreendida como a radiação provida de todo o céu disperso por elementos atmosféricos e do albedo constituído pela parcela que se faz refletida ao atingir o solo, gerando desta forma a Equação (9) para quantificar a irradiação em superfície inclinada β graus em relação ao plano horizontal, onde a primeira parcela decorre da radiação direta, a segunda da radiação difusa e a terceira do albedo.

$$\overline{H}_\beta = \overline{H}\left(1+\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right)\overline{R}_b + \overline{H}_d\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad (9)$$

Hay (1979), Temps e Coulson (1977), Klucher (1979), ou Perez *et al.* (1987), deduzem a radiação incidente H_T a partir de medidas da radiação global e das componentes direta e difusa à superfície horizontal, sendo a discrepância apresentada pelos pesquisadores provenientes dos parâmetros de isotropia e anisotropia da componente difusa incidente sobre a superfície e a componente média mensal da radiação difusa que de acordo com Scolar *et al* (2004), definido por Collares, Pereira e Rabl (1979) poderá ser tratada simplificadamente pela equação (10).

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = \overline{K}_d = 0{,}775+0{,}00606\left(\omega_s-90\right)-\left[0{,}505+0{,}00455\left(\omega_s-90\right)\right]\cos\left(115\,\overline{K}_t-103\right) \qquad (10)$$

Na qual o adimensional K_d é o índice de claridade atmosférico diário da componente difusa e $\overline{K}_d$ a média mensal do mesmo.

Por outro lado é definida a equação (11) por Duffie e Beckman (2006), citada por Ríspoli (2008) para latitudes ao Sul, da qual “$\overline{R}_b$” é dotado como a razão entre a radiação diária média mensal sobre uma superfície inclinada e a radiação diária mensal sobre um plano horizontal, podendo ser utilizada particularmente em casos de não existência de desvios azimutais, ou seja, coletores solares bem orientados.

$$\overline{R}_b = \frac{\cos\ (\phi+\beta)\cos\delta\ \text{sen}\omega'_s + \frac{\pi}{180}\omega'_s\ \text{sen}\ (\phi+\beta)\ \text{sen}\delta}{\cos\phi\cos\delta\ \text{se}\ \ \ \ \ \ \text{en}\ \phi\ \text{sen}\delta} \quad (11)$$

11.03

Sendo, " ω'_s" o ângulo horário do pôr do Sol em superfície inclinada, definido pelo menor valor entre:

$$\text{arco}\cos\left(-\text{tg}\phi\ \text{tg}\delta\right) \quad \text{ou} \quad \text{arco}\cos\left(-\tan\ (\phi+\beta)\ \tan\delta\right) \quad (12)$$

Finalmente, "ρ_g" é variável de acordo com a superfície terrestre, admitindo-se, por exemplo, para cidades ou vias asfaltadas valores de 5% a 19%, para campos úmidos 20%, áreas com neve 90%, entre outras condições predeterminadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

DESCRIÇÃO DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS

RADIASOL V1: Banco digital de dados terrestres elaborado em 1998 pelo Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para fornecer estimativas de radiação solar sobre o plano horizontal e inclinado na superfície terrestre e extraterrestre em qualquer período do ano a partir da localidade discriminada inicialmente e da escolha entre modelos de anisotropia e isotropia do céu. Esta ferramenta, admite a inclusão de dados solares além de apresentar farto banco de dados que permite a análise sobre o plano inclinado com diversas orientações azimutais (γ) e sobre o ângulo de inclinação do coletor em relação ao plano horizontal (β) indicado pelo usuário. Para comparação dos métodos ajusta-se o *software* ao modelo isotrópico que melhor caracteriza as medidas mensais brasileiras segundo Ríspoli (2008), bem como β = 17° por equivaler à inclinação normalmente empregada para coberturas com telha cerâmica, supondo também apoio direto da placa coletora solar nesta superfície.

METODOLOGIA PARA SIMPLIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE H_T

Ríspoli *et al.* (2013) ao revisar os resultados computacionais oferecidos pelo Radiasol V1 sobre H_T em planos inclinados bem orientados (insolação Norte para o Hemisfério Sul) percebe que os valores de H_T são ligeiramente superiores a H, supostamente pela contribuição da componente difusa e do albedo.

Do mesmo modo, aqui admite-se que a área de um semicírculo formado pelas coordenadas cartesianas (6;0) (12;I) (18;0) tem valor ligeiramente superior a H, e que referido valor estaria estatisticamente muito próximo ao valor de H_T em situações de pouco desvio azimutal dos coletores solares e com inclinação "β" de 17° em relação ao plano horizontal, adequando assim a integral apresentada na Equação (4) para um semicírculo afetado por K_t com aproximação para H_T, sob um aval estatístico para validação da veracidade da simplificação proposta. As abscissas 6, 12 e 18 dos pontos cartesianos do semicírculo, representam em média anual o amanhecer às 6 horas, o anoitecer às 18 horas e o máximo de irradiância solar ao meio dia solar, desprezando por sua vez, a favor da segurança, a irradiação solar antes das 6 e após as 18 horas.

Ajusta-se, através do teorema de Lagrange, um polinômio do segundo grau para a função do semicírculo na forma função de "h" contando com os valores numéricos das três coordenadas cartesianas, em vez de utilizar o tradicional procedimento dos mínimos quadrados, pois o polinômio segundo a dedução de Lagrange torna a dedução final mais simples ao justificar que as linhas de influência L_0 e L_2 conforme critérios de irradiação admitidos serão anuladas por apresentarem função I(h) = 0. Assim, o uso deste teorema simplifica o procedimento matemático quando comparado a outros artifícios, como o uso de sistemas de equações lineares para modelar a parábola através das metodologias de resolução de Gauss ou Cramer, resultando mais trabalhosas neste estudo para o aceite de uma equação que satisfaça os pontos cartesianos conhecidos. Igualmente, de acordo com o princípio de Lagrange citado por Chapra e Canale (2008) cada linha de influência $L_i(h)$ será 1 em h_i e

0 em todos os outros pontos da amostra. Logo, cada produto $L_i(h)\ I(h_i)$ assume o valor $I(h_i)$ no ponto h_i da amostra. Consequentemente, conforme indicado na Equação (13), o somatório de todos dos produtos da linha de influência pelo seu respectivo peso, ou I(h), fornecerá um único polinômio de grau "n-1", onde "n", neste caso, equipara-se ao número de coordenadas cartesianas conhecido.

$$f(h) = I(h) = \sum_{i=0}^{n} L_i(h)\ I(h_i) \tag{13}$$

$$L_i(h) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n} \frac{h - h_j}{h_i - h_j} \tag{14}$$

Assim, a partir da rotina (15) se obtém uma função de segundo grau contando com os três pontos cartesianos já citados.

$$f(h) = I(h) = I(h_o)\ L_0 + I(h_1)\ L_1 + I(h_2)\ L_2 = 0\frac{(h-12)(h-18)}{(6-12)(6-18)} + I_{o12}\frac{(h-6)(h-18)}{(12-6)(12-18)} + 0\frac{(h-6)(h-12)}{(18-6)(18-12)} \tag{15}$$

Dita rotina deve compreender que "h" é a hora solar em questão, e "I_{o12}" a irradiância solar máxima que ocorre ao meio dia solar no topo da atmosfera terrestre. Ao simplificar algebricamente a expressão (15) encontra-se uma função sintética apresentada em (16), no caso para a irradiância extraterrestre I_o.

$$I_o \cong \frac{I_{012}}{-36}\left(h^2 - 24h + 108\right) \tag{16}$$

Ao integrar-se "I_o" entre as 6 às 18 (horário solar médio mensal anual para ao amanhecer e anoitecer), encontra-se uma função de H_o muito mais simples do que a originalmente apresentada na Equação (4).

$$H_o \cong \int_6^{18} I_o\, dh \rightarrow H_o \cong \frac{I_{o12}}{-36}\int_6^{18} (h^2 - 24h + 108)\, dh \rightarrow H_o \cong 8\ I_{o12} \tag{17}$$

Segundo estabelecido na Equação (1), determina-se a irradiância média mensal anual ao meio dia solar ($\overline{I_{o12}}$) a partir da declinação solar "δ" de cada um dos meses do ano, bem como para cada dia médio mensal "n" estabelecido de acordo com os critérios de Duffie e Beckman (2006), permanecendo como variável a latitude "ϕ", conforme a disposição da Tabela 1.

Irradiância no topo da atmosfera ao meio dia solar			
Mês	**n**	**δ**	**I_{o12}**
Janeiro	17	-20,9529	1410,196 [(0,933874 cos ϕ) - (0,3576 sen ϕ)]
Fevereiro	47	-13,0277	1398,152 [(0,974261 cos ϕ) - (0,22542 sen ϕ)]
Março	75	-2,51243	1379,492 [(0,999039 cos ϕ) - (0,04384 sen ϕ)]
Abril	105	9,3203	1356,474 [(0,986798 cos ϕ) + (0,16195 sen ϕ)]
Maio	135	18,72522	1336,198 [(0,947069 cos ϕ) + (0,32103 sen ϕ)]
Junho	162	23,06485	1324,697 [(0,920062 cos ϕ) + (0,39177 sen ϕ)]
Julho	198	21,23821	1323,459 [(0,932082 cos ϕ) + (0,36225 sen ϕ)]
Agosto	228	13,56596	1334,951 [(0,972101 cos ϕ) + (0,23456 sen ϕ)]
Setembro	258	2,359968	1354,792 [(0,999152 cos ϕ) + (0,04118 sen ϕ)]
Outubro	288	-9,46077	1377,813 [(0,986398 cos ϕ) - (0,16437 sen ϕ)]
Novembro	318	-18,8171	1398,017 [(0,946553 cos ϕ) - (0,32255 sen ϕ)]
Dezembro	344	-23,0184	1409,133 [(0,920379 cos ϕ) - (0,39103 sen ϕ)]
Média			**1366,948 [(0,959814 cos ϕ) + (0,00066 sen ϕ)]**

Tabela 1: Irradiâncias solares mensais extraterrestres ao meio dia solar obtidas a partir da Equação (1).

Admite-se para efeito de simplificação, junto a expressão média apresentada na Tabela 1, que a parcela agregada devido a componente senoidal seja insignificante por representar valores mínimos. Logo, afirma-se que: 11.05

$$\overline{I_{012}} \cong 1312{,}016 \cos\phi \qquad (18)$$

Ainda, conforme citado por Scolar *et al* (2004), $\overline{H_T}$ é ligeiramente superior a $\overline{H}$, admitindo para tanto que a área abaixo do semicírculo aqui adotado determinaria a irradiação em plano horizontal extraterrestre sendo ligeiramente maior que a real, podendo ser declarado que ao afetar H_o dado pela Equação (17), pelo índice de claridade médio, $\overline{K_t}$, admitindo a hipótese aqui descrita chega-se aproximadamente a irradiação solar em plano inclinado sobre superfícies terrestre, originando assim uma simples e elementar aproximação para $\overline{H_T}$ aqui exposto pela Equação (19).

$$\overline{H_T} \cong 8\, K_t\, I_{o12} \cong 10{,}496\, \overline{K_t}\, (\cos\phi) \qquad (19)$$

Na qual, $\overline{H_T}$ é calculado em kWh/m²dia e $\overline{K_t}$ poderá ser fundamentado através do uso do banco de dados como o Radiasol V1, conforme este estudo desde que a região do projeto esteja cadastrada no *software*, ou sugestivamente, de acordo com Ríspoli (2008), atribuindo o coeficiente de acordo com qualidade visual do céu que representa a localidade da implantação ao longo do ano, como ilustrado na Figura 1, desta forma o K_t é arbitrado visualmente de acordo com as condições climáticas de cada região, poluição ambiental, nebulosidade e temporada do ano, podendo ser associados valores de 0 a 0,80 em condições de desconhecimento da informação, ou ausência de dados em *softwares*, conforme a seguinte parecer:

K_t = 0,30 a 0,40 K_t = 0,50 a 0,60 K_t = 0,60 a 0,80

Figura 1: Sugestões intuitivas da classificação visual do índice de claridade atmosférica (K_t) apresentado por Ríspoli (2008).

Todavia, como já revelado antes, Ríspoli (2008) encontrou estatisticamente uma forte tendência central para o valor de 0,50 para o K_t médio mensal do Norte ao Sul do Brasil, representando um valor bastante coerente para arbitrar no dimensionamento médio mensal anual quando não se tem maiores informações locais e nem se abusa do empirismo sugerido pela Figura 1.

Logo, para aferição da Equação (19), escolheram-se cinco capitais brasileiras: Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul, apresentando menor quantidade de irradiação de acordo com o Radiasol V1, decorrente de suas características climatológicas locais, além de ser o município mais distante da Linha do Equador. Seguido pela capital paulista e goiana, representando as regiões sudeste e centro-oeste, cujo clima predominante durante o ano é respectivamente subtropical úmido e tropical com baixa incidência pluviométrica. Por fim estuda-se, a capital litorânea do Rio Grande do Norte, Natal, e Belém, capital do Estado do Pará, que representam os municípios mais próximos da linha do Equador dentre as localidades escolhidas, apresentando nesta amostra os maiores índices brasileiros de irradiação terrestre sobre o plano inclinado. Analogamente, interpretam-se os resultados para dimensionamentos na cidade argentina de Mendoza que possui um clima árido e continental com grandes oscilações de temperatura ao longo do ano, além de precipitações escassas.

Com o intuito de comparar a irradiação terrestre sobre o plano inclinado com aplicabilidade no dimensionamento de sistemas termossolares, busca-se inicialmente a latitude de cada uma das cidades escolhidas, juntamente com as condições de disposição das placas coletoras solares, fixando para tanto

a inclinação em relação ao plano horizontal em 17° por corresponder a tendência construtiva de coberturas com telha cerâmica e admitindo desvio azimutal em relação ao Norte Verdadeiro variável entre a situação ótima, ou seja, sem desvios, com 45° ou 90°, representando, no último caso, coletores totalmente orientados para o leste ou para o oeste.

Da mesma forma, na elaboração deste estudo consideram-se volumes de água quente de acordo com os reservatórios disponíveis no mercado, empregando assim, 500 l, 1000 l, 2000 l e 5000 l, agregando à temperatura natural 35°C para suprir a demanda de calor junto aos usuários da edificação, prevendo também o incremento de 15% sobre o valor inicial, conforme exigido pela normatização para compensar possíveis perdas de calor, gerando a área coletora solar em m², simplificada por Ríspoli (2013) pela equação (20).

$$A_{coletora} = \frac{\frac{\text{Volume } \Delta T \ 1{,}15}{860}}{\eta \ H_T} \tag{20}$$

Da qual, "η" é o rendimento homologado pelo Instituto de Metrologia Brasileiro (INMETRO) para diferentes fabricações dos coletores solares, adotando-se neste trabalho o rendimento de 60% que caracteriza uma boa fabricação tendo em vista o uso de placa absorvedora de área unitária igual a 1,22 m² em alumínio com caixa de vidro que é padrão econômico da indústria brasileira e ainda com "H_T" retirado diretamente pelo *software* selecionado a partir das condições detalhadas e pela formulação aqui proposta em (19), aproveitando o K_t médio mensal anual fornecido pelo Radiasol V1 com arredondamento do número de placas coletoras para baixo em respostas com decimais menores que 0,30, pois se entende que com esta consideração não haverá interferência na quantidade de calor requerido. Para melhor compreensão, os dados gerados foram agrupados em planilhas avaliando a irradiação H_T, a área coletora, o número de placas absorvedoras para os dois processos esclarecidos, além da comparação entre os métodos a partir da subtração da área coletora dimensionada com H_T dado pelo equacionamento proposto em (19) ante a informação do Radiasol V1, onde o sinal negativo corresponde a um resultado da irradiação média em superfície inclinada delimitada pela Equação (19) maior do que a obtida através *software*, sugerindo uma área coletora subdimensionada ao se aplicar a formulação simplificada.

Observa-se também que os termos "Eq. (19)" nas tabelas de 2 até 13 remetem a Equação (19) simplificada neste artigo, que em processo de cálculo utiliza $\overline{K_t}$ de acordo com o Radiasol V1. Porém ao fixar o coeficiente de claridade atmosférica em 0,50 conforme a sugestão de Ríspoli (2008) em caso de desconhecimento das condições climáticas o dimensionamento da área coletora seria globalmente satisfatório.

RESULTADOS

Coletores sem desvio azimutal			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,99	7,35	7,82	-0,48	6	7
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,55	6,60	7,03	-0,43	5	6
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,15	7,32	7,58	-0,26	6	6
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	4,01	9,36	9,73	-0,37	8	8
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,57	8,53	8,53	0,00	7	7
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	5,05	8,02	7,73	0,29	7	7

Tabela 2: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 500 l com coletores solares orientados para o Norte Verdadeiro.

Coletores com 45° de desvio			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,97	7,35	7,85	-0,50	6	7
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,54	6,60	7,04	-0,44	6	6
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,07	7,32	7,70	-0,38	6	6
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,97	9,36	9,83	-0,47	8	8
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,51	8,53	8,66	-0,13	7	7
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,95	8,02	7,87	0,14	7	7

Tabela 3: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 500 l com coletores solares desviados 45° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 90°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,93	7,35	7,91	-0,57	6	7
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,52	6,60	7,07	-0,47	6	6
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	4,87	7,32	8,01	-0,69	6	7
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,87	9,36	10,08	-0,71	8	8
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,34	8,53	8,98	-0,45	7	8
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,73	8,02	8,25	-0,23	7	7

Tabela 4: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 500 l com coletores solares desviados 90° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores sem desvio			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,99	14,69	15,64	-0,95	12	13
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,55	13,20	14,06	-0,87	11	12
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,15	14,64	15,16	-0,52	12	13
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	4,01	18,72	19,46	-0,74	16	16
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,57	17,06	17,07	-0,01	14	14
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	5,05	16,03	15,46	0,57	13	13

Tabela 5: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 1000 l com coletores solares orientados para o Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 45°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	E (1	11.08	ol	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,97	14,69	15,69	-1,00	12	13
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,54	13,20	14,08	-0,88	11	12
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,07	14,64	15,39	-0,75	12	13
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,97	18,72	19,65	-0,93	16	16
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,51	17,06	17,31	-0,25	14	14
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,95	16,03	15,75	0,29	13	13

Tabela 6: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 1000 l com coletores solares desviados 45° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 90°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,93	14,69	15,82	-1,13	12	13
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,52	13,20	14,14	-0,95	11	12
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	4,87	14,64	16,02	-1,38	12	13
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,87	18,72	20,15	-1,43	16	17
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,34	17,06	17,96	-0,90	14	15
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,73	16,03	16,49	-0,46	13	14

Tabela 7: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 1000 l com coletores solares desviados 90° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores sem desvio			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,99	29,38	31,28	-1,90	24	26
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,55	26,39	28,12	-1,73	22	23
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,15	29,28	30,31	-1,03	24	25
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	4,01	37,44	38,91	-1,47	31	32
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,57	34,12	34,14	-0,02	28	28
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	5,05	32,07	30,92	1,14	26	26

Tabela 8: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 2000 l com coletores solares orientados para o Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 45°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	11.09	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,97	29,38	31,38	-2,00	24	26
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,54	26,39	28,16	-1,76	22	23
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,07	29,28	30,78	-1,51	24	25
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,97	37,44	39,31	-1,86	31	32
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,51	34,12	34,63	-0,51	28	29
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,95	32,07	31,49	0,58	26	26

Tabela 9: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 2000 l com coletores solares desviados 45° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 90°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,93	29,38	31,64	-2,26	24	26
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,52	26,39	28,29	-1,90	22	23
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	4,87	29,28	32,03	-2,76	24	26
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,87	37,44	40,30	-2,86	31	33
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,34	34,12	35,92	-1,80	28	30
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,73	32,07	32,98	-0,92	26	27

Tabela 10: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 2000 l com coletores solares desviados 90° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores sem desvio			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,99	73,46	78,21	-4,75	60	64
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,55	65,98	70,31	-4,33	54	58
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,15	73,19	75,78	-2,59	60	62
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	4,01	93,61	97,29	-3,68	77	80
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,57	85,30	85,34	-0,04	70	70
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	5,05	80,17	77,31	2,86	66	64

Tabela 11: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 5000 l com coletores solares orientados para o Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 45°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	E (1	11.10	;ol Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,97	73,46	78,46	-5,00	60	65
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,54	65,98	70,39	-4,41	54	58
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	5,07	73,19	76,96	-3,77	60	63
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,97	93,61	98,27	-4,66	77	81
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,51	85,30	86,57	-1,27	70	71
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,95	80,17	78,73	1,44	66	65

Tabela 12: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 5000 l com coletores solares desviados 45° em relação ao Norte Verdadeiro.

Coletores com desvio de 90°			H_T (kWh/m²dia)		Área coletora (m²)			N° de Placas Coletoras	
Local	Lat. Sul (°)	$\overline{K_t}$	Eq. (19)	Radiasol V1	Eq. (19)	Radiasol V1	Variação entre os métodos	Eq. (19)	Radiasol V1
Belém PA	1,47	0,506	5,31	4,93	73,46	79,11	-5,66	60	65
Natal RN	5,77	0,566	5,91	5,52	65,98	70,72	-4,74	54	58
Goiânia GO	16,68	0,530	5,33	4,87	73,19	80,09	-6,90	60	66
São Paulo SP	23,5	0,433	4,17	3,87	93,61	100,75	-7,14	77	83
Porto Alegre RS	30	0,503	4,57	4,34	85,30	89,80	-4,50	70	74
Mendoza Argentina	33,05	0,553	4,87	4,73	80,17	82,46	-2,29	66	68

Tabela 13: Irradiação solar, área coletora e variação de resultados obtidos para o volume de 5000 l com coletores solares desviados 90° em relação ao Norte Verdadeiro.

CONCLUSÕES

Conforme verificado, a função desenvolvida pode ser empregada no Brasil todo preferencialmente com boa orientação da área coletora solar ou com o máximo desvio de 45° do Norte Geográfico em até 5000 litros de reserva de água a ser aquecida, com a certeza que não haverá superdimensionamentos se os coletores solares forem sobrepostos em telhados cerâmicos a 30% de inclinação (aproximadamente 17° com relação ao plano horizontal) e adoção de um índice de claridade atmosférico fiel, que caracterize bem a climatologia média mensal anual do local em questão.

ABSTRACT: A methodology consistent with exhaustive itineraries developed by Duffie and Beckman (2006) and Liu and Jordan (1960) to outline the solar irradiation in a inclined plane over the earth's surface under isotropic conditions becomes essential for the spread of thermosolar technology. Therefore, the purpose of this study is to produce an equation based on the latitude and in the local atmospheric clarity coefficient to estimate the radiation absorbed by the solar collectors fixed on a slope of 17º. Equally, the result derived from this new formulation is compared with that provided by a free computer application Radiasol V1, determining jointly the solar collector area through the two tools, according to the recommendations of Brazilian standard NBR 15569; 2008, thus proving the

effectiveness of the simplified procedure in situations of azimuth deviations of up to 45º in relationship to True North for booking volumes up to 5000 liters.

Keywords: Simplified equation; solar irradiation on a inclined plane over the earh's surface, solar sizing, azimuth deviation.

RESUMEN: Un método de cálculo sencillo que equivalga a las complejas rutinas de Duffie y Beckman (2006) y Liu y Jordan (1960) para delinear la irradiación solar sobre un plano inclinado en la superficie terrestre en condiciones isotrópicas se hace esencial para la propagación de la tecnología termo solar. En este eje de estudio la propuesta de este trabajo es producir una función que dependa del índice de claridad atmosférico y de la latitud local para estimar la cantidad de energía solar absorbida por colectores solares fijos a una inclinación de 17° con relación al plano horizontal que corresponde a la mayoría de los tejados que se ejecutan con tejas cerámicas que tienen como especificación 30% de inclinación. Se hace una comparación entre la respuesta de la ecuación criada y datos del aplicativo computacional Radiasol V1, al calcularse la aria de acuerdo con la norma brasileña NBR 15569:2008 comprobando así los resultados satisfactorios incluso en situaciones donde se lleva en cuenta desvíos azimutales de 45° con relación del Norte Geográfico para volúmenes de hasta 5000 litros de agua.

Palavras Chaves: Cálculo Sencillo; Irradiação Solar sobre Plano Inclinado na Superfície Terrestre; Dimensionamento Solar; Desvíos Azimutales.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15569: Sistema de Aquecimento solar de água em circuito direto – projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2008.

Chapra, S. C.; Canale, R. P. Métodos numéricos para engenharia. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008. 832p.

Duffie, J. A.; Beckman, W. A. Solar engineering of thermal processes. 3ª ed. Wisconsin: John Wiley & Sons, 2006.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Programa Brasileiro de Etiquetagem - Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água - Coletores Solares para banho. Edição de 12/12.

Krenzinguer, A., Salvadoretti, J. L., Prieb,C. W. M.Laboratório De Energia Solar. - Software Radiasol. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/>. Acesso em 25 de junho de 2015.

Gordon, J. M. Solar Energy: the state of the art. 1ª ed. New York: James & James, 2001.

Labaki, L.C. Tratamento de dados climáticos de Campinas - SP, para análise do desempenho térmico de Edificações. Encontro Nacional de Modelos de Simulação de Ambientes, 1, 358-366, 1995.

Liu, B. Y. H., Jordan, R. C., The Interrelationship and Caracteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy. 1960, v.4, n. 3, p. 1-19.

Melania I, V., Reinaldo P. R. Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para a região de Cascavel – PR, Engenharia Agrícola de Jabuticabal, v.25, n.1, p.76-85.

Oliveira, A. P. et al. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. Applied Energy, [S.l.], v. 69, p. 59-73, 1997.

Ríspoli, Í. A. G. O aquecedor solar brasileiro: teoria e prática em prol de uma transferência de tecnologia sustentável. Campinas, SP, 2008. [s.n.]. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2008.

Ríspoli, Í. A. G. Analista Termossolar. Curso de Extensão Universitária do Centro Universitário Adventista de São Paulo, Engenheiro Coelho, 2013.

Ríspoli Í. A. G. Kowalski, Montaute, M. G. Limitações de um Método Empírico no Dimensionamento de Aquecedores Solares de Água em Situações de Desvio Azimutal para os Coletores Solares. Asociación Argentina de Energía Solar ASADES, Congreso Internacional Universidad Pública de Tucumán, Argentina, 2013.

Scolar, J., Martins, D., Escobedo, J.F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. Botucatu: Departamento de Ciências Ambientais da UNESP, 2004. 10p.