

ANÁLISE COMPARATIVA DE CURVAS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL TEÓRICAS COM HISTÓRICOS SOLARIMÉTRICOS

Rubens Soeiro Gonçalves – soeiro@ifma.edu.br

Bruno de Alencar Carneiro – brunoalnk@hotmail.com

Joaquim Teixeira Lopes – teixeira@ifma.edu.br

Denise Maria Machado Cruz – dmmc01@yahoo.com.br

Paulo Pacheco Pinto - paullo_grb@hotmail.com

Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Departamento de Engenharia Mecânica Industrial

Resumo. *O presente estudo desenvolvido em software analisa a radiação extraterrestre na superfície horizontal e inclinada a partir de curvas simuladas de ângulo de declinação solar, ângulo zenital, ângulo azimutal e ângulo de altura solar, comparando com dados e históricos solarimétricos de estações meteorológicas das localidades estudadas. Com base na trigonometria esférica, a definição de funções de ângulo zenital, altura solar, radiação solar são experimentadas simulando em ambiente MATLAB, sendo trabalhadas para que se crie um programa que gere as estimativas de radiação em uma determinada localidade conforme o usuário define. As curvas testadas mostram os parâmetros ao longo do dia e do ano. Em adição, comparando-se as curvas com históricos levantados por institutos de medidas solarimétricas. As curvas, conforme aplicação, servirão de apoio a projetos de seguidores solares em placas fotovoltaicas para melhor aproveitamento de energia solar, relevante na formação de engenheiros e/ou futuros pesquisadores, atendendo assim às demandas pedagógicas dos cursos de Engenharia mecânica, Licenciatura em Física e Engenharia elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA.*

Palavras-chave: *Energia Solar, software, Didático*

1. INTRODUÇÃO

A humanidade vive de um momento onde reavalia-se bastante a sustentabilidade de suas fontes de energia em face às consequências alarmantes do aquecimento global e da poluição gerada pelo uso de combustíveis fósseis e impactos ambientais em projetos de usinas hidrelétricas. Alternativas de fontes de energia renováveis se apresentam cada vez mais interessantes no mercado, tais como energia solar, eólica, maremotriz, geotérmica entre outras. Dessas, a que está em maior estudo é a solar, provida através de módulos e painéis solares baseando-se no princípio do efeito fotovoltaico, que produz uma diferença de potencial elétrica na junção de dois materiais semicondutores ao serem excitados por radiações eletromagnéticas, no caso, a iluminação solar (Jager et al, 2014).

Entre as vantagens da utilização da energia solar estão a inesgotabilidade da fonte de energia, diferentemente das fontes convencionais que são fontes limitadas; a facilidade de instalação de um projeto fotovoltaico em localizações remotas, podendo ser utilizada em qualquer lugar e independentemente da localização geográfica, portanto agregando qualidade de vida. Aliada a todas estas vantagens está a questão ambiental. As outras fontes de energia produzem danos à natureza, quer seja na construção de hidrelétricas ou através de emissões gasosas prejudiciais, emissões de fuligens ou gases tóxicos favorecendo o efeito estufa e poluição sonora quando em funcionamento, diferentemente da energia solar de baixo dano ambiental relativo a outros meios de energias renováveis, desconsiderando o impacto causado pela mineração e fabricação do silício e outros materiais semicondutores componentes de módulos, e área de implantação em usinas solares de larga escala, segundo Tolmasquim (2004). Em comparação com a energia nuclear, este último apresenta um custo de investimento muito alto e ainda padece de incertezas quanto à geração de resíduos radioativos e a sua gestão de tratamento dos mesmo, conforme visto durante o desastre de Fukushima em 2011; portanto a energia solar por meio de placas fotovoltaicas conta com a vantagem de ser uma energia limpa em sua geração, não deixando resíduo de produção além da fabricação dos materiais semicondutores envolvidos. A possibilidade de empreendimento de um projeto fotovoltaico pela possibilidade de implantação de modo personalizado, o custo zero de transporte de energia desde a geração ao consumo e o custo mínimo de manutenção para uma considerável vida útil de aproximadamente 25 anos (Jager et al, 2014) são outras grandes vantagens da energia solar, uma vez que os painéis solares são instalados próximo ao local de consumo, diferentemente da energia elétrica proveniente da rede concessionária local que necessita em geral de quilômetros de linhas de transmissão e manutenção frequente, além de ter impostos cobrados. Este é o fator que vem fazendo com que a energia solar esteja cada vez mais em utilização nos dias atuais.

Mas esta comprovada tecnologia, ainda que com bastante potencial, apresenta a principal desvantagem que é o custo efetivo relativamente alto comparado a outros métodos de geração de eletricidade não-renováveis ou causadoras de impactos ambientais, além de que as células solares possuem baixa eficiência de conversão de luz solar em energia. O nível de eficiência é dividido em categorias de acordo com o tipo de cristal e processo de fabricação: 16,5% em cristais

monocristalinos derivados do processo Czochralski, 24,2% através da produção de cristais monocristalinos pela técnica de Float-Zone e de 14,25% a 16,2% em policristalinos (CRESESB, 2014). Além disso, um projeto fotovoltaico fica restrito à exposição solar somente durante o dia, havendo necessidade (conforme escolha do cliente) de uma bateria para compensar a demanda energética durante a noite, justamente onde ocorrem os maiores picos diários de energia pelas redes concessionárias.

A otimização da absorção da radiação solar é um dos pontos críticos pelo qual a tecnologia de painéis fotovoltaicos luta para alcançar mais relevantes indicadores, pois os grandes produtores de placas solares estão localizados em regiões de baixa incidência solar. Segundo Pereira et al. (2006), foram constatadas em regiões do território brasileiro as médias anuais entre 4200 e 6700 kWh/m², muito superiores às da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Serão utilizados como referências estatísticas para a simulação de curvas teóricas solarimétricas o mapeamento histórico de irradiação solar em diversas localidades do Brasil, estudado através de estações meteorológicas (Pereira et al., 2006), disponibilizadas no site (<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>).

Segundo o projeto, foi feito o cálculo de irradiância solar diária mensal em qualquer ponto do território nacional e disponibilizado na internet através do programa SunData, para apoio ao dimensionamento de projetos fotovoltaicos. Para estudo, quatro localidades em pontos distintos de latitude (São Luís, Salvador, São Paulo e Porto Alegre) do país serão analisados e comparados com curvas teóricas de ângulo zenital, altura solar e irradiância solar, determinando o grau de ajuste das curvas com o histórico obtido.

As localizações geográficas são dadas a seguir (IBGE):

- São Luís: 2° 34' 41,8" S 44° 18' 10" O
- Salvador: 12° 58' 16" S 38° 30' 39" O
- São Paulo: 23° 32' 52" S 46° 38' 09" O
- Porto Alegre: 30° 01' 58" S 51° 13' 48" O

Segundo o histórico obtido pelas estações solarimétricas, as cidades apresentam as radiações incidentes no plano horizontal:

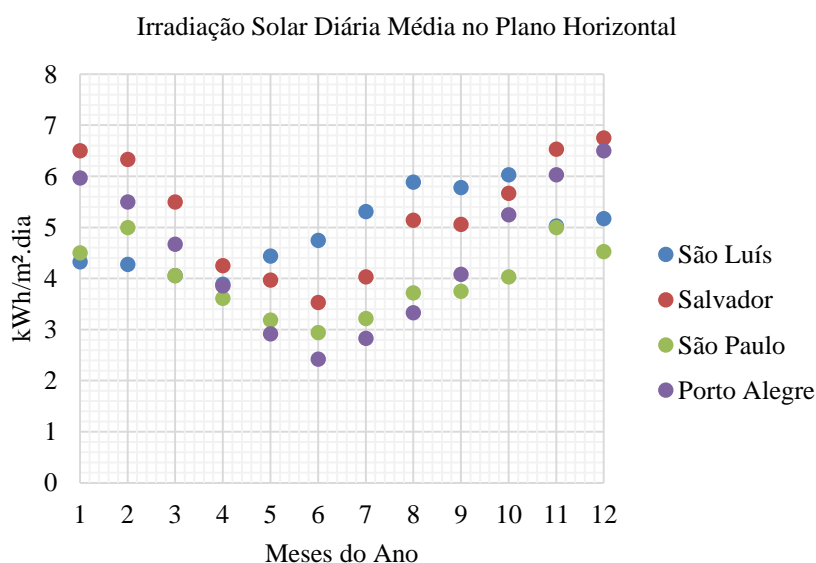


Figura 1 – Histórico levantado ao longo do ano da irradiação solar diária média no Plano Horizontal. Fonte : Crescesp

2.2 Modelamento do sistema fotovoltaico

Antes de iniciarmos o modelamento de dados de radiação solar, segundo Duffie et al. (1991), é preciso compreender as relações trigonométricas existentes entre a posição de um plano orientado em qualquer forma e qualquer momento, no caso a esfera que é o corpo geométrico que bem define o planeta Terra, em respeito à direção e à componente direta da radiação incidente, o Sol. A inclinação dessa forma é dada por:

$$\cos \theta = \text{sen } \delta * \text{sen } \phi * \cos \beta - \text{sen } \delta * \cos \phi * \text{sen } \beta * \cos \gamma_s + \cos \delta * \cos \phi * \cos \beta * \cos H + \cos \delta * \text{sen } \beta * \cos \gamma_s * \cos H + \cos \delta * \text{sen } \beta * \text{sen } A * \text{sen } H \quad (1)$$

Onde:

β = ângulo que se forma com o terreno horizontal ou ângulo de incidência

ϕ = latitude

δ = declinação solar

γ_s = ângulo azimutal solar

ω = ângulo horário solar

O ângulo horário solar é o deslocamento angular de Leste a Oeste da incidência meridional do Sol, partindo do próprio meridiano da localidade. É definida pela eq. (2) com a hora solar representada por H_s e indicando 15° a cada unidade, sendo convencionados valores negativos do início do dia até o meio-dia e positivos ao final do mesmo:

$$\omega = 15 * (H_s - 12) \quad (2)$$

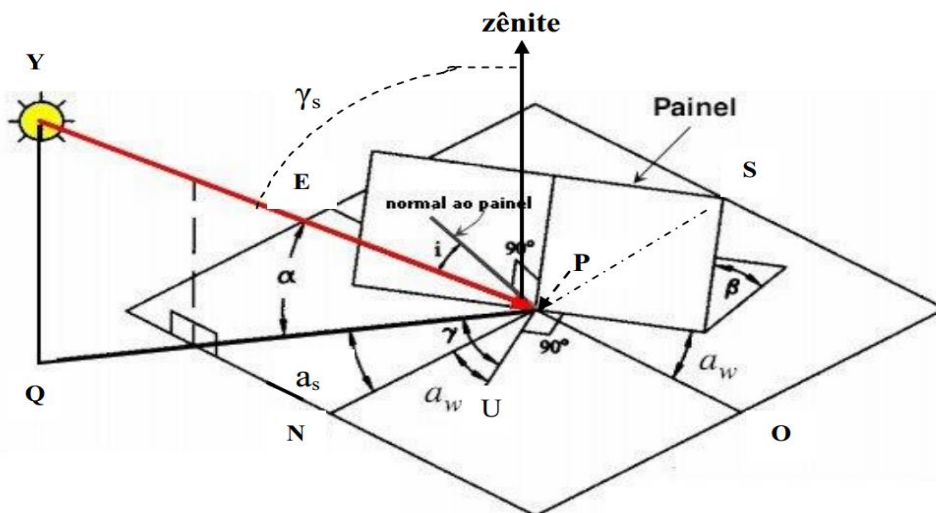


Figura 2 – Sistema de coordenadas no estudo de trigonometria terrestre, com orientação para a altura solar (α), o ângulo zenital (γ_s)

Quando se fala de um plano com a superfície na horizontal, ou seja, $\beta = 0^\circ$, temos o caso excepcional onde o ângulo de inclinação θ é denominado ângulo zenital, formado pela linha dos raios solares com a vertical (zênite). Este é representado por:

$$\begin{aligned}\cos \theta_z &= \sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega \\ \theta_z &= \arccos(\sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega)\end{aligned}$$

O ângulo zenital apresenta uma relação complementar com o ângulo de altura solar, que é formado pela linha dos raios solares com o plano horizontal, ou seja:

$$\alpha = 90^\circ - z = \arcsin[\sin \delta * \sin \phi + \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega] \quad (6)$$

O ângulo azimutal é descrito como a projeção horizontal dos raios solares e a direção Norte-Sul no plano horizontal. É positivo se o Sol estiver a Oeste do Sul, e negativo de estiver a Este do Sul. Para o caso específico em que $\theta = 90^\circ$ e $\psi = 90^\circ$, uma relação é obtida para a sua definição, que é dada por:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \delta * \cos \phi - \sin \phi * \cos \omega}{\cos \omega} \quad (7)$$

Tanto o ângulo de altura solar quanto o zenital dependem de duas variáveis importantes na sua obtenção, estes são o ângulo horário H e a declinação solar δ . O primeiro representa o ângulo medido na direção oeste ao longo do equador celeste a partir do meridiano que passa por um observador até ao círculo horário de um corpo celeste ou de um certo ponto, no caso um meridiano terrestre no intervalo de uma hora. Já a declinação solar representa o ângulo entre o plano do equador e a reta definida pelos centros da Terra e do Sol, variando entre $-23,45^\circ$ no solstício do Inverno (21 de Dezembro) e $+23,45^\circ$ no solstício do Verão, e é definida por:

$$\delta = -23,45^\circ * \left(1 - \cos\left(\frac{360 * (d + 284)}{365}\right)\right) \quad (8)$$

Para conectarmos o estudo do ângulo de incidência solar com sistemas fotovoltaicos, é necessário o entendimento da irradiância solar para tal. Utilizando o conceito de Horas de Sol Pleno para avaliação do potencial energético da localidade, equivale à razão da energia total diária incidente sobre uma superfície inclinada em kWh/m² (quilowatt-hora por metro quadrado) com o padrão de condições de testes – igual a 1.000 W/m² (watt por metro quadrado) com massa de ar estabelecida AM=1,5 (Duffie et al., 1991). A partir das horas de Sol pleno, um projeto fotovoltaico terá um parâmetro de quantos módulos serão necessários para ser instalados para cobrir certa demanda calculada:

$$HSP = \frac{H_T}{1000} \quad (9)$$

A radiação solar global total incidente no plano inclinado (H_T), segundo Duffie et al. (1991), é função das radiações difusa e direta em plano horizontal, utilizando a equação (10):

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_D}{H}\right) R_B + H_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + H \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (10)$$

Sendo:

H : radiação solar global incidente no plano horizontal (kWh/m²);

H_D : radiação solar difusa incidente no plano inclinado (kWh/m²);

ρ_g : refletância da vizinhança ou emitância da superfície nas proximidades do painel fotovoltaico (adimensional)

β : ângulo formado pelo plano horizontal e o inclinado das placas fotovoltaicas

O valor de R_B corresponde à razão entre a radiação extraterrestre - sem os efeitos atenuantes da atmosfera, incidente no plano inclinado e a incidente no plano horizontal (9):

$$R_B = \frac{\left(\frac{\pi}{180} * \omega_s\right) \times (\text{sen } \delta * \text{sen } \phi * \cos \beta - \text{sen } \delta * \cos \phi * \text{sen } \beta * \cos \gamma)}{\cos \phi * \cos \delta * \text{sen } \omega_s + \left(\frac{\pi}{180} * \omega_s\right) \times (\text{sen } \delta * \text{sen } \phi)} + \frac{\text{sen } \omega_s * \cos \delta \times (\cos \phi * \cos \beta + \text{sen } \phi * \text{sen } \beta * \cos \gamma)}{\cos \phi * \cos \delta * \text{sen } \omega_s + \left(\frac{\pi}{180} * \omega_s\right) \times (\text{sen } \delta * \text{sen } \phi)} \quad (11)$$

Sendo que ω_s corresponde ao pôr-do-sol aparente para a superfície inclinada (12):

$$\omega_s = \text{mínimo} \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi * \tan \delta) \\ \cos^{-1}[-\tan(\phi + \beta)] \tan \delta \end{array} \right] \quad (12)$$

O cálculo da radiação solar global incidente no plano horizontal (H), expressa em kWh/m², é realizado com a equação (14) e depende do valor da radiação solar extraterrestre (H₀).

$$\frac{H}{H_0} = a + b * \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (13)$$

Na equação (13), N é a duração média do período diurno (h/dia); n é a insolação média diária (h/dia); a, b e c são coeficientes empíricos tabelados e mostrados na Tabela 1. Conhecidos como coeficientes de Angstrom, são obtidos por estudos experimentais e cabe um melhor detalhamento devido ao fato de que dependem mutuamente de fatores climáticos e vegetativos locais.

Tabela 1 - Coeficientes empíricos para o cálculo da radiação solar global incidente. Fonte : Pereira, Angelocci & Sentelhas (2002)

Localidade	Coeficientes de Angstrom-Prescott	
	a	b
São Luís	0,26	0,33
Salvador	0,29	0,39
São Paulo	0,23	0,56
Porto Alegre	0,20	0,56

A radiação solar extraterrestre (H₀), expressa em kWh/m², pode ser calculada pela equação (14).

$$H_0 = 2,778 * 10^7 * \frac{24 * 3600 * G_{SC}}{\pi} * \left[1 + 0,0033 * \cos * \left(\frac{2\pi d}{365} \right) \right] * (\cos \phi * \cos \delta * \text{sen } \omega_s + \omega_s * \text{sen } \delta * \text{sen } \phi) \quad (14)$$

G_{sc} é definido como Constante Solar e significa o fluxo de energia radiante, expresso em W/m², que incide normalmente ao plano 3 de uma superfície colocada fora da atmosfera terrestre (extraterrestre). O valor dessa constante é de 1.367 W/m² [4]. Já o cálculo da radiação solar difusa incidente no plano inclinado (H_D), expressa em kWh/m², é realizado com a equação (9).

$$\frac{H_D}{H} = 0,775 + 6,06 * 10^{-3} * (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,455 * 10^{-3} * (\omega_s - 90)] * \cos(115 * K_t - 103) \quad (15)$$

2.3 Método

A Fig. 1 mostra o fluxograma para a obtenção das curvas de ângulo zenital x hora do dia, altura solar x hora do dia, irradiação solar x hora do dia.

Em seguida tem-se a análise comparativa com um histórico coletado por estações meteorológicas

- 1) Entrada dos parâmetros de localização geográfica:
Φ (latitude), β (inclinação da placa), h (altitude), d (dia decorrido do ano), H_s (hora do dia)

Constantes do dimensionamento:
G_{sc} (constante solar) = 1367 W/m²

- 2) Calcular os cinco curvas iniciais de angulação: δ: eq (1); H_s: eq (2); z: eq (3); a: eq (4); γ: eq (5); θ: eq (1)

- 3) Calcular ω_s : eq (10), H_o : eq (12), R_b : eq (11)
- 4) Para obtenção da radiação global total incidente no plano horizontal H_o , calcular $\bar{N} = \frac{2}{15} * \cos^{-1}(-tg \varphi * tg \delta)$, consultar Coeficientes de Angstrom-Prescott empíricos e insolação diária média de históricos solarimétricos na literatura
- 5) Calcular radiação difusa incidente no plano inclinado H_D , radiação global total incidente H_T e Horas de Sol Pleno
- 6) Calcular o coeficiente de determinação ajustada, encontrando o nível de ajuste da radiação global total incidente H_T com os dados históricos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo os dados parâmetros, através de algoritmos elaborados em ambiente MATLAB, as curvas de angulação e de radiação foram obtidas ao longo do ano para todas as cidades:

- Latitude de São Luís: 2.5°
- Latitude de Salvador: 13°
- Latitude de São Paulo: 23.5°
- Latitude de Porto Alegre: 30°
- Ângulo de inclinação da placa: 0°
- Índice de Refletância da Vizinhança: 0.4

Para observar a variação da radiação solar durante o ano, foi estipulado uma marcação de horário fixo, sendo este o meio-dia (onde o ângulo horário $H_s = 0^\circ$), no qual teoricamente observamos a mais forte incidência de raios solares para dias de céu claro.

Desenvolvida toda a rotina de funções para a obtenção de radiação ao longo do ano em ambiente MATLAB, juntamente com a análise das localidades, foi desenvolvido um programa gerado pelo GUIDE MATLAB que obtém a estimativa a partir de qualquer latitude, como etapa do dimensionamento de projetos fotovoltaicos residenciais. Através do mesmo, foram estruturadas as análises.

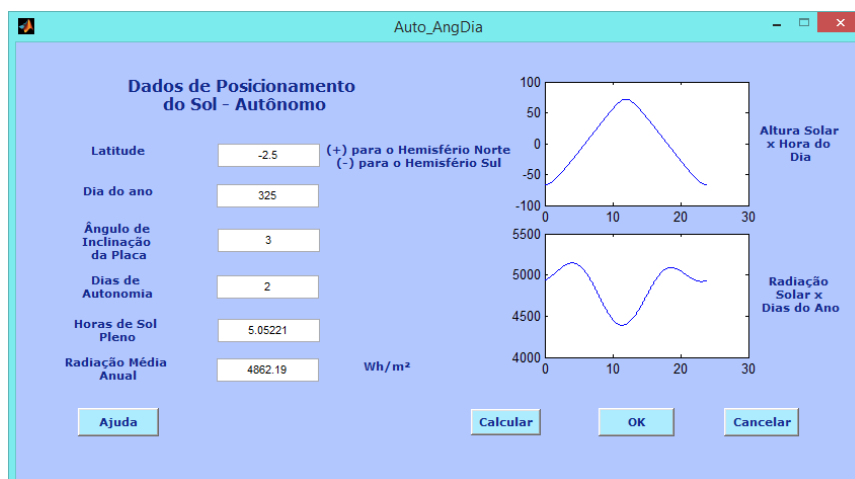


Figura 3 – Construção do programa em MATLAB para estimativa de radiação solar média anual e horas de Sol pleno conforme o dia do ano

Conforme foi calculado, comparou-se as curvas desenvolvidas para a radiação solar diária ao longo do ano com o histórico de médias mensais de radiação coletado por estações meteorológicas. O resultado é mostrado através da Fig. (6).

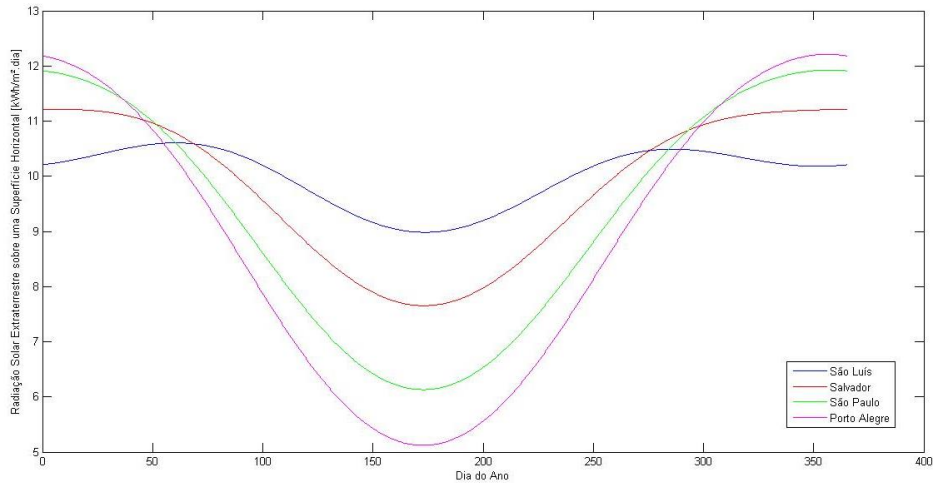


Figura 4 – Gráfico comparativo entre as curvas teóricas de radiação solar extraterrestre nas localidades

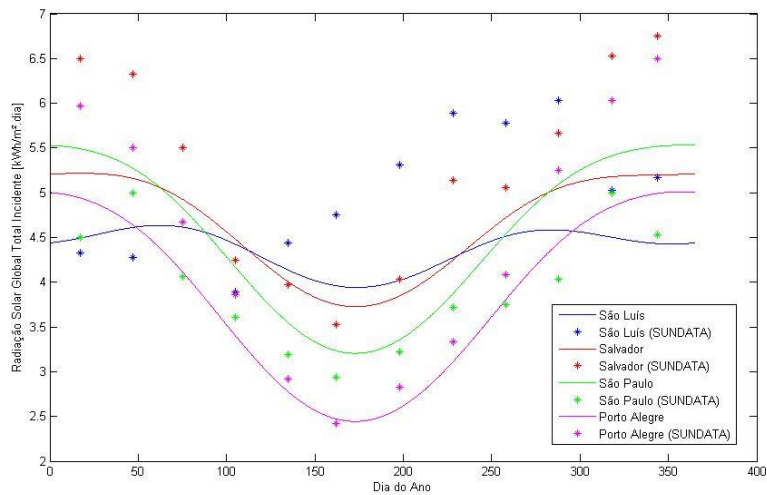


Figura 5 – Gráfico comparativo entre as curvas teóricas de radiação solar diária nas localidades e seus respectivos históricos coletados por estações meteorológicas

Os resultados abrem margem para discussão quanto à variabilidade da radiação devido ao clima e as estações, que influem bastante na incidência da radiação solar direta. Os coeficientes de Angstrom-PreScott, que são o resultado empírico de ajuste para a estimativa teórica, têm peso crucial no resultado, sendo necessário um trabalho estatístico mais cuidadoso na obtenção de números mais precisos e levando em consideração o período chuvoso de certas cidades, como é o caso da cidade de São Luís (com chuvas entre Janeiro a Maio).

Quanto à diferença de radiação em relação à latitude, foi evidenciado o efeito do distanciamento da linha do Equador no nível de radiação extraterrestre recebida durante o inverno, no meio do gráfico, nos quais as localidades mais distantes recebem menor radiação; e durante o verão, no início e final do gráfico, onde ocorre o pico de radiação recebida pelas mais distantes do Equador. Além disto, observa-se a diferença de variação das baixas e picos de radiação em períodos diferentes do ano, onde as cidades mais próximas do Equador possuem menor profundidade na curva de radiação que as localidades mais distantes.

4. CONCLUSÃO

Mediante ao que foi estudado, desenvolvido e analisado, a análise de curvas solarimétricas é uma importante ferramenta de estudo para estimativas de projetos fotovoltaicos de vários níveis de abrangência ao encontrar potenciais

de energia conforme a localidade pesquisada. Além disto, com a base de trigonometria esférica no cálculo de posicionamento do Sol, a análise pode ajudar no estudo de projetos de seguidores solares para melhor eficiência de captação de radiação pelas placas fotovoltaicas.

O programa em MATLAB gerado através deste trabalho também se torna uma grande ajuda na capacitação de estudantes, professores, engenheiros e pesquisadores na demanda pedagógica dos cursos de Engenharia mecânica, Licenciatura em Física e Engenharia elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA na área de energia solar, por possibilitar com esta ferramenta didática a análise eficaz das referidas curvas na melhoria da precisão de dimensionamento de projetos de painéis fotovoltaicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFMA e a FAPEMA pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Duffie J. A. and Beckman W. A. (1991) **Solar Engineering of Thermal Processes**, 2nd edn., Wiley Interscience, New York.
- Pereira, E. B. et al., 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 81 p.
- UFPE, 2000. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. 1ª ed.** Recife, Ed. Universitária da UFPE. ISBN 85-7315-142-0. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, Rio de Janeiro: CRESESB. 1999.
- LOPES, Joaquim Teixeira. **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar tipo bacia com cobertura assimétrica**. UFU: 2013 (Tese)
- JÄGER, K; ISABELLA, O.; SMETS, A.H.M; SWAAIJ, R.A.C.M.M.van; ZEMAN, M. **Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems**. The Netherlands DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY: set/2014.
- GALDINO, M.A. **Criação de Quatro Centros de Demonstração de Energias Renováveis em diferentes regiões do país**. Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém: 3/09/2010.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>.
- PEREIRA, A R; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Ed. Agropecuária Ltda. 2002
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- Tolmasquim, Maurício T. et al. **Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil**. Editora Relume Dumará. Rio de Janeiro, 2004.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THEORETICAL GLOBAL SOLAR RADIATION WITH SOLARIMETRIC DATA

Abstract. *This present study developed in software analyze the extraterrestrial radiation on horizontal and inclined surface from simulated curves of solar declination, zenith, azimuthal and solar height angle, comparing with solarimetric data from meteorological stations at studied locations. Based on spherical trigonometry, the definition of zenith, solar height and radiation angle functions are experimented by simulation at MATLAB environment, being developed in order to the creation of a program which can plot radiation estimates for a particular locality as the user inputs. The tested curves show the parameters tested throughout the day and year. In addition, comparing the curves with history raised by solarimetric measurement institutes, it analyzes the theoretical setting with data to assess the statistical coefficient of determination of the plots. The curves, according to an application, will support solar tracker projects at photovoltaics at better exploitation of solar energy, being relevant at the graduation of engineers and/or future researchers, thus meeting the educational demand from courses in Mechanical Engineering, Electrical Engineering and Bachelor in Physics at Federal Institute of Education, Science and Technology of Maranhão – IFMA.*

Key words: *Solar Energy, Solar Radiation, Educational*