

# **Avaliação de Modelos Matemáticos de Estimativa de Irradiação Solar em Superfícies Inclinadas**

## **Evaluating mathematical models for estimating solar irradiation on titled surfaces**

**Daniel Akira Arima Tokkue, Estudante de graduação em Engenharia de Produção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.**

daat765@gmail.com

**Juliane Silva de Almeida, Professora, Universidade Federal de Santa Catarina.**

juliane.almeida@ufsc.br

### **Resumo**

A energia solar tem sido uma alternativa proeminente de geração de energia limpa nos últimos anos. Entretanto, estimar a irradiação solar em superfícies inclinadas tem sido um desafio. O objetivo deste trabalho foi comparar diferentes métodos de estimativa de irradiação solar, para estabelecer a melhor forma de se obter a estimativa mensal em uma superfície inclinada de módulos fotovoltaicos para aplicação em telhados de edificações. Os modelos avaliados utilizam como variáveis de entrada a latitude da cidade da edificação e o ângulo da inclinação dos módulos fotovoltaicos. Foram realizados cálculos utilizando os métodos de Liu e Jordan e de Page. Validou-se os modelos por meio da comparação entre seus resultados e banco de dados de irradiação solar medidas em diversas localidades do Brasil. Entre os resultados, observou-se que o método de Liu e Jordan é o mais exato no cálculo da irradiação solar em superfícies inclinadas.

**Palavras chaves:** Energia Solar Fotovoltaica; Superfície Inclinada; Geração de Energia Elétrica

### **Abstract**

*Solar energy has been a prominent alternative of clean energy in recent years. Nevertheless, estimating solar irradiation on tilted surfaces is somewhat complex. This article aims to compare different techniques of estimating solar irradiation on tilted surfaces in order to verify which model is best suited on photovoltaic rooftop applications. Besides that, the evaluated techniques depend on the following parameters: latitude and the angle of the photovoltaic module tilted surface. The Liu and Jordan and Paige models were evaluated. To assess the estimated results, they were compared with solar irradiation data sources from a few Brazilian cities. Therefore, among the results the Liu and Jordan technique was the most accurate in solar irradiation estimates.*

**Keywords:** solar-energy; titled-surface; energy-generation

## 1. Introdução

A necessidade de diversificação de fontes de energia, em virtude das demandas por redução de emissão de gases do efeito estufa e, inicialmente, a crise do petróleo, trouxe para o auge o debate de energias renováveis, dentre elas, a energia solar. O desenvolvimento da tecnologia implica na expansão do setor de solar e a adaptação dos setores de engenharia tais como a engenharia civil e a engenharia elétrica para atender a demanda da sociedade por uma forma de geração de energia alternativa.

De acordo com Pereira et al. (2017), a produção de energia renovável solar fotovoltaica e eólica nos últimos anos tem crescido. Porém, ainda apresenta participação significativa do todo. A participação da energia solar é pouco expressiva em comparação com outras fontes (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Conforme relatado em Pereira et al. (2017) e no Balanço Energético Nacional de (2019), é necessário diversificar as fontes de produção de energia, principalmente fontes de menor impacto ambiental e que proporcionem segurança energética.

Como descrito em Santos (2014), a energia solar, dentro das fontes renováveis, é o único tipo de energia limpa em que é possível a conversão direta do recurso natural em energia elétrica, a partir das células fotovoltaicas. Sua característica modular permite a aplicação sob pequenas superfícies, por exemplo, sob telhados de prédios, edifícios, casas, condomínios. Neste contexto, a geração solar fotovoltaica é praticada na forma de micro ou minigeração distribuída, quando conectada à rede de distribuição de energia elétrica.(ANEEL, 2018). Pela parte da demanda da sociedade, há uma procura crescente da instalação de módulos fotovoltaicos para suprir e abater na tarifa de energia elétrica, uma vez que a Resolução Normativa 482 de (2012) ANEEL permite a compensação de valores na fatura de energia elétrica, caso haja excedente de produção de energia. Para isso, é interessante realizar uma previsão do quanto uma instalação pode gerar e quanto pode atender ao planejar a instalação do sistema fotovoltaico.

Um exemplo de planejamento de sistema fotovoltaico aplicado a edificações foi apresentado em Antonioli et al. (2018), o prédio localizado na cidade de Fraiburgo, Santa Catarina, é composto por três apartamentos, duas lojas e uma área de uso comum. Essa edificação estava na fase de projeto e dispunha de projeto elétrico. A partir dos dados do projeto planejou-se o sistema fotovoltaico do prédio e o sistema de partilha de créditos de energia elétrica entre as unidades consumidoras que o compõe. A energia gerada seria injetada na rede e abatida na conta de luz ao final do mês para cada unidade do edifício conforme as cotas de partilha definidas pelo sistema descrito anteriormente. Entretanto, para elaborar projetos de cobertura de módulos fotovoltaicos em edificações, é necessário calcular a incidência da irradiação solar sob a superfície inclinada dos módulos, que serão integrados à arquitetura da cobertura da edificação.

Para calcular a incidência de irradiação solar na superfície inclinada do sistema fotovoltaico planejado em Antonioli et al. (2018), utilizou-se do programa Radasol (2010). Todavia, nem sempre se dispõe de programas para cálculo de irradiação em superfícies inclinadas. Por este motivo, o presente artigo visa estudar modelos matemáticos de estimativa de irradiação solar em superfícies inclinadas, tais como Liu e Jordan, e Page (KLEIN, 1972). Tal motivação se deve pelo fato de que nem sempre é possível instalar os módulos em sua inclinação ótima, próxima à latitude da cidade da edificação. A instalação dos módulos deve obedecer às características construtivas da edificação para que a disposição dos módulos obedeça aos requisitos de integração arquitetônica.

O objetivo do trabalho é avaliar os métodos de estimativa de irradiação solar em superfícies inclinadas e verificar qual dentre eles são o mais interessante aplicar para

gerar uma estimativa de produção de energia por módulos fotovoltaicos de diferentes inclinações e em diferentes localidades.

## 2. Metodologia

Em primeiro lugar, selecionaram-se os métodos de cálculo de irradiação incidente em superfícies inclinadas. Optou-se para a realização da estimativa, os métodos descritos por Klein (1977), Liu e Jordan e Page, para a construção da estimativa das irradiações mensais no plano inclinado na cidade de Madison, USA feito em 1976. Os dados foram simulados utilizando a adaptação do roteiro para Brasília, Florianópolis e Fraiburgo, e posteriormente comparados com o banco de dados de irradiação solar mensal sob o plano inclinado em relação à latitude do Sun Data do CRESESB e com o banco de dados de coleta de irradiação apresentado no Atlas Solarimétrico do Brasil para validação dos métodos (“CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica”, [s.d.]; PEREIRA et al., 2017).

As fórmulas a seguir correspondem às utilizadas na estimativa de irradiação extraterrestre de acordo com a latitude, parâmetro utilizado tanto no modelo de Liu e Jordan, quanto no modelo de Page, de acordo com Klein (1977), e que utiliza como variável independente a latitude e a inclinação do sol em graus, representativa das horas.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left[360\left(\frac{284 + n}{365}\right)\right] \quad (1)$$

$$w = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (2)$$

$$H_0 = \frac{24}{\pi} ISC \left[1 + \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right] \left[\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}w + \left(\frac{w2\pi}{360}\right) \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta\right] \quad (3)$$

Sendo,

$\delta$  – o valor da inclinação solar em graus;

$\phi$  – o valor da latitude em graus;

$\omega$  – o valor da inclinação do sol em graus;

$H_0$  é o valor da irradiação solar extraterrestre em  $\text{kJ m}^2/\text{dia}$ ;

ISC – a constante solar equivalendo  $4871 \text{ kJ h}^{-1} \text{ m}^2$ ;

$n$  – o número correspondente ao dia.

Em seguida, estima-se o coeficiente de transmissão da atmosfera ( $R_b$ ), que corresponde à razão entre a irradiação incidente no plano inclinado e a irradiação incidente na superfície horizontal.

$$w' = \min[w, \arccos[-\tan(\phi - s) \cdot \tan\delta]] \quad (4)$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi - s) \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}w' + \frac{\pi}{180} w' \cdot \text{sen}(\phi - s) \cdot \text{sen}\delta}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}w + \frac{\pi}{180} w \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta} \quad (5)$$

Em que,

$\omega'$  – ângulo entre o intervalo do nascer e por-do-sol na superfície inclinada em graus;

$R_b$  – Coeficiente de transmissão da atmosfera adimensional;

$s$  – é o ângulo de inclinação da superfície em graus.

Nesta etapa, os métodos de Liu e Jordan e Page se diferenciam, de tal modo que o método de Page apresenta uma relação linear de cálculo da razão entre a irradiação difusa sob o plano inclinado e a irradiação solar extraterrestre.

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (6)$$

$$\frac{H_d}{H} = 1,39 - 4,027K_t + 5,531K_t^2 - 3,108K_t^3 \quad (7a)$$

$$\frac{H_d}{H} = 1 - 1,13K_t \quad (7b)$$

Sendo:

H – Irradiação global na superfície horizontal em kJ m<sup>2</sup>/ dia;

K<sub>t</sub> – Relação entre a irradiação na superfície horizontal com a irradiação extraterrestre;

H<sub>d</sub> / H – fração entre a irradiação difusa e a irradiação global sob a superfície horizontal.

Esses parâmetros, assim como R<sub>b</sub>, serão utilizados para obter a irradiação global sob a superfície inclinada (H<sub>t</sub>). A irradiação na superfície horizontal (H) foi retirada do banco de dados da CRESESB para poder aplicar junto com a irradiação solar extraterrestre calculada anteriormente. No artigo de Klein (1972), foram obtidos dados coletados por instrumentos de medição.

As equações 7a e 7b, são fundamentais para obter, a estimativa de irradiação global no plano inclinado. A equação 7a corresponde à equação desenvolvida por Liu e Jordan para o cálculo da irradiação difusa, assim como a equação 7b foi desenvolvida por Page. Nota-se que a fração da irradiação difusa (R<sub>b</sub>) deve ser tratada como uma única incógnita. Assim, ela irá facilitar os próximos cálculos restantes.

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right)R_b + \frac{H_d}{H} \cdot \frac{(1 + \cos s)}{2} + \rho \cdot \frac{(1 - \cos s)}{2} \quad (8)$$

$$H_t = R \cdot H \quad (9)$$

Sendo:

R – Razão entre a irradiação diária na superfície inclinada e superfície horizontal por mês;

ρ – Albedo equivalente a 0,2;

H<sub>t</sub> – irradiação solar total recebida no plano inclinado em kJ m<sup>2</sup> / dia.

Ao final dos cálculos, para realizar a validação, é necessário transformar as unidades de energia Joules (J) em Watt-hora (Wh). As unidades utilizadas no estudo de Klein (1972) foram as definidas no sistema internacional (J/m<sup>2</sup>), diferente das unidades utilizadas nos bancos de dados do CRESESB e Atlas Solarimétrico do Brasil (kWh/m<sup>2</sup>) (“CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica”, [s.d.]; PEREIRA et al., 2017). A irradiação solar total recebida no plano inclinado (H<sub>t</sub>) é o resultado procurado.

Definidas as equações utilizadas nos métodos de cálculo de Liu e Jordan e Page, aplicam-se os cálculos utilizando dados de irradiação global de superfícies horizontais obtidos no SunData, do CRESESB, para as três cidades sugeridas (“CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica”, [s.d.]).

Após a obtenção dos resultados de aplicação dos métodos de Liu e Jordan e Page, realizou-se a etapa de validação. Nesta etapa, comparou-se os resultados de aplicação dos métodos citados anteriormente com as irradiações de superfícies inclinadas de mesmo ângulo que a latitude, uma vez que tal inclinação é a disponibilizada pelos bancos de dados, e pelo fato de ser apontada como a inclinação ótima dos módulos fotovoltaicos (“CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica”, [s.d.]; PEREIRA et al., 2017; SANTOS, 2014).

Todavia, para a comparação de valores em relação ao banco de dados da Atlas Solarimétrico do Brasil, foi selecionada uma parcela de dados de irradiação de cada cidade devido à disposição dos dados nessa base. Pelo fato de haver dados de irradiação para diferentes pontos de uma mesma cidade, calculou-se a média e o desvio padrão de amostras de irradiação medidas cobrindo consideravelmente a área da cidade. Cada cidade teve valores proporcionais coletados proporcionalmente à extensão territorial.

### 3. Resultados

#### 3.1 Florianópolis

método	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan	27,601°	5,2299	5,1931	4,9249	4,4217	3,9872	3,5221	3,6050	4,1766	3,8242	4,2625	5,0255	5,2568
	27,601°	5,2809	5,2027	4,9581	4,4217	4,0027	3,5554	3,6371	4,1344	3,8711	4,2625	5,0868	5,2651
	27,5°	5,1885	5,1906	4,9100	4,3603	3,9252	3,5183	3,5358	4,2099	3,8670	4,2263	5,0169	5,1774
Page	27,601°	5,2675	5,1933	4,8785	4,3294	3,8694	3,3911	3,4782	4,0725	3,7584	4,2469	5,0543	5,3040
	27,601°	5,3180	5,2028	4,9121	4,3294	3,8853	3,4249	3,5107	4,0295	3,8048	4,2469	5,1153	5,3122
	27,5°	5,2281	5,1911	4,8573	4,2543	3,7892	3,3878	3,3972	4,1304	3,8056	4,2117	5,0440	5,2249
CRESESB	27,601°	5,23	5,20	4,93	4,42	3,98	3,52	3,60	4,17	3,82	4,27	5,02	5,26
	27,601°	5,29	5,20	4,96	4,41	4,00	3,55	3,62	4,13	3,87	4,27	5,09	5,27
	27,5°	5,19	5,20	4,94	4,41	4,00	3,52	3,59	4,14	3,83	4,22	5,03	5,19

Tabela 1 – Resultado e comparação entre os valores de Liu & Jordan, Page e o banco de dados da CRESESB para Florianópolis

O valor do ângulo de inclinação é igual à latitude em todos esses casos de comparação. Como descrito na metodologia, os resultados de Liu e Jordan são devido ao uso da fórmula 7a e os resultados de Page foi utilizado a fórmula 7b.

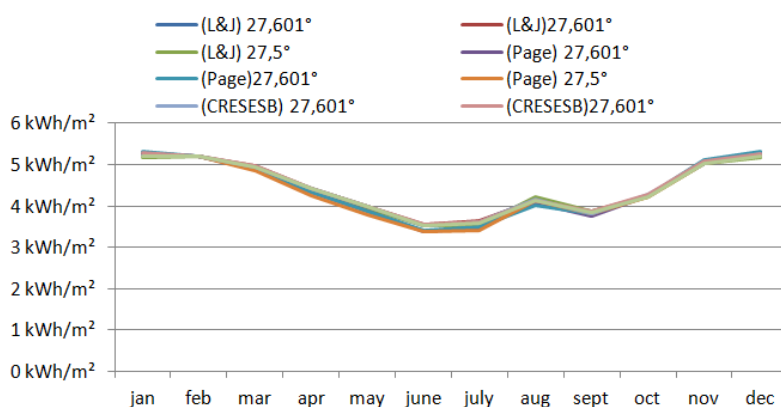


Figura 1 – Gráfico de relação de valores em comparação as irradiações no plano inclinado com os dados do CRESESB para Florianópolis

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan com CRESESB	27,601°	0,0001	0,0069	0,0051	0,0017	0,0072	0,0021	0,0050	0,0066	0,0042	0,0075	0,0055	0,0032
	27,601°	0,0091	0,0027	0,0019	0,0117	0,0027	0,0054	0,0171	0,0044	0,0011	0,0075	0,0032	0,0049
	27,5°	0,0015	0,0094	0,0300	0,0497	0,0748	0,0017	0,0542	0,0699	0,0370	0,0063	0,0131	0,0126

latitude	média	erro	$\sigma$
27,601°	0,0046	0,10%	0,0023
27,601°	0,0060	0,13%	0,0045
27,5°	0,0300	0,68%	0,0255

Tabela 2 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da CRESESB para Florianópolis

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Page com CRESESB	27,601°	0,0375	0,0067	0,0515	0,0906	0,1106	0,1289	0,1218	0,0975	0,0616	0,0231	0,0343	0,0440
	27,601°	0,0280	0,0028	0,0479	0,0806	0,1147	0,1251	0,1093	0,1005	0,0652	0,0231	0,0253	0,0422
	27,5°	0,0381	0,0089	0,0827	0,1557	0,2108	0,1322	0,1928	0,0096	0,0244	0,0083	0,0140	0,0349

latitude	média	erro	$\sigma$
27,601°	0,0673	3,93%	0,0151
27,601°	0,0637	3,97%	0,0143
27,5°	0,0760	7,33%	0,0171

Tabela 3 – Diferença de valores de Page em relação ao banco de dados da CRESESB para Florianópolis

método	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan	27,601°	5,2299	5,1931	4,9249	4,4217	3,9872	3,5221	3,6050	4,1766	3,8242	4,2625	5,0255	5,2568
	27,601°	5,2809	5,2027	4,9581	4,4217	4,0027	3,5554	3,6371	4,1344	3,8711	4,2625	5,0868	5,2651
	27,5°	5,1885	5,1906	4,9100	4,3603	3,9252	3,5183	3,5358	4,2099	3,8670	4,2263	5,0169	5,1774
Page	27,601°	5,2675	5,1933	4,8785	4,3294	3,8694	3,3911	3,4782	4,0725	3,7584	4,2469	5,0543	5,3040
	27,601°	5,3180	5,2028	4,9121	4,3294	3,8853	3,4249	3,5107	4,0295	3,8048	4,2469	5,1153	5,3122
	27,5°	5,2281	5,1911	4,8573	4,2543	3,7892	3,3878	3,3972	4,1304	3,8056	4,2117	5,0440	5,2249
LABREN	27°	5,2538	5,2810	5,0539	4,5306	4,0265	3,5618	3,6286	4,2294	3,9601	4,3303	5,1441	5,2908
	S	0,0712	0,0876	0,0617	0,0377	0,0330	0,0255	0,0304	0,0442	0,0513	0,0711	0,0737	0,0789

Tabela 4 – Resultado e comparação entre os valores de Liu & Jordan, Page e o banco de dados da LABREN para Florianópolis

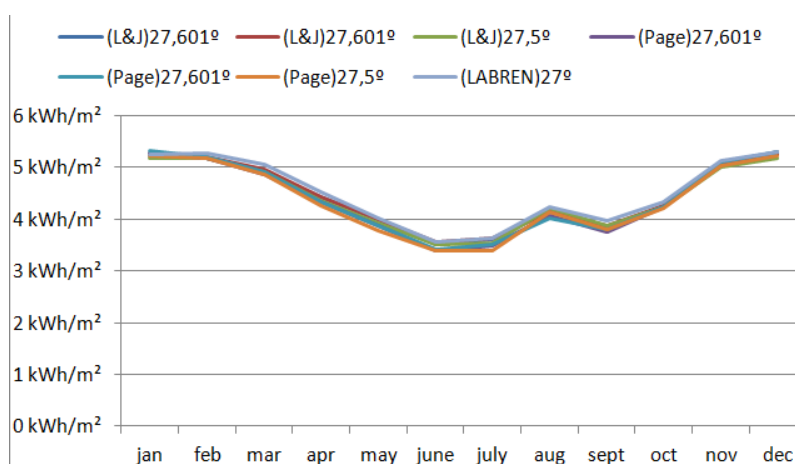


Figura 2 – Gráfico de relação de valores em comparação às irradiações no plano inclinado com os dados do LABREN para Florianópolis

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan com LABREN	27,601°	0,0238	0,0879	0,1290	0,1089	0,0393	0,0396	0,0236	0,0528	0,1359	0,0677	0,1187	0,0339
	27,601°	0,0271	0,0783	0,0957	0,1089	0,0238	0,0064	0,0085	0,0950	0,0891	0,0677	0,0574	0,0257
	27,5°	0,0652	0,0904	0,1439	0,1704	0,1013	0,0434	0,0928	0,0195	0,0931	0,1040	0,1273	0,1134

latitude	média	erro	$\sigma$
27,601°	0,0718	1,59%	0,0406
27,601°	0,0570	1,26%	0,0355
27,5°	0,0971	2,15%	0,0396

Tabela 5 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da LABREN para Florianópolis

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Page com LABREN	27,601°	0,0138	0,0877	0,1753	0,2012	0,1571	0,1707	0,1505	0,1569	0,2017	0,0834	0,0898	0,0133
	27,601°	0,0642	0,0782	0,1418	0,2012	0,1412	0,1369	0,1179	0,1999	0,1554	0,0834	0,0288	0,0214
	27,5°	0,0257	0,0899	0,1965	0,2763	0,2373	0,1739	0,2314	0,0989	0,1546	0,1185	0,1002	0,0659

latitude	média	erro	$\sigma$
27,601°	0,1251	2,77%	0,0634
27,601°	0,1142	2,52%	0,0572
27,5°	0,1474	3,26%	0,0737

Tabela 6 – Diferença de valores entre Page em relação ao banco de dados da LABREN para Florianópolis

### 3.2 Brasília

método	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan	15,701°	4,9473	5,3552	5,0395	5,2663	5,5316	5,7112	6,0160	6,7386	5,9055	5,3349	4,6426	4,9152
	15,701°	4,9649	5,3458	5,0701	5,3341	5,6067	5,6979	5,8717	6,6288	5,8948	5,3638	4,7411	4,9152
	15,801°	4,9050	5,3662	5,0410	5,3025	5,5101	5,5960	5,9023	6,5962	5,8970	5,3654	4,6977	4,8910
Page	15,701°	4,9926	5,3759	5,0329	5,2366	5,5065	5,7019	6,0154	6,7462	5,8946	5,3467	4,6826	4,9663
	15,701°	5,0100	5,3666	5,0636	5,3054	5,5843	5,6880	5,8653	6,6337	5,8838	5,3754	4,7810	4,9663
	15,801°	4,9503	5,3867	5,0343	5,2732	5,4844	5,5819	5,8974	6,6003	5,8860	5,3769	4,7376	4,9421
CRESESB	15,701°	4,93	5,34	5,02	5,26	5,52	5,70	6,00	6,74	5,89	5,32	4,62	4,90
	15,701°	4,95	5,33	5,05	5,32	5,60	5,69	5,86	6,62	5,88	5,34	4,72	4,90
	15,801°	4,88	5,35	5,03	5,28	5,50	5,58	5,89	6,59	5,88	5,34	4,67	4,87

Tabela 7 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da CRESESB para Brasília

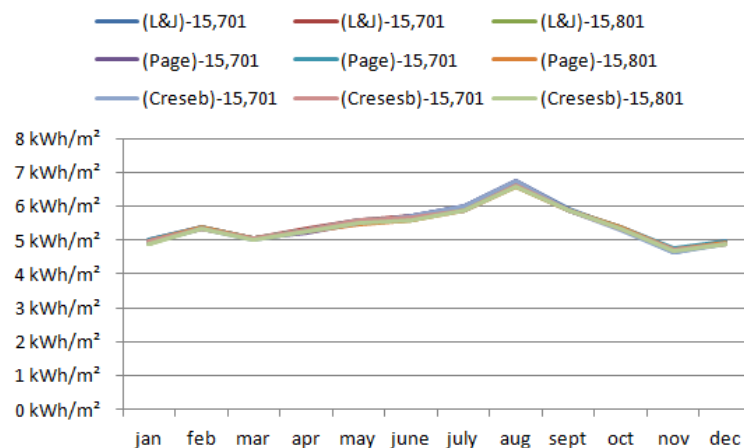


Figura 3 – Gráfico de relação de valores em comparação as irradiações no plano inclinado com os dados do CRESESB para Brasília

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan com CRESESB	15,701°	0,0173	0,0152	0,0195	0,0063	0,0116	0,0112	0,0160	0,0014	0,0155	0,0149	0,0226	0,0152
	15,701°	0,0149	0,0158	0,0201	0,0141	0,0067	0,0079	0,0117	0,0088	0,0148	0,0238	0,0211	0,0152
	15,801°	0,0250	0,0162	0,0110	0,0225	0,0101	0,0160	0,0123	0,0062	0,0170	0,0254	0,0277	0,0210

latitude	média	erro	$\sigma$
15,701°	0,0139	0,26%	0,0054
15,701°	0,0146	0,27%	0,0051
15,801°	0,0175	0,32%	0,0066

Tabela 8 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da CRESESB para Brasília

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Page com CRESESB	15,701°	0,0626	0,0359	0,0129	0,0234	0,0135	0,0019	0,0154	0,0062	0,0046	0,0267	0,0626	0,0663
	15,701°	0,0600	0,0366	0,0136	0,0146	0,0157	0,0020	0,0053	0,0137	0,0038	0,0354	0,0610	0,0663
	15,801°	0,0703	0,0367	0,0043	0,0068	0,0156	0,0019	0,0074	0,0103	0,0060	0,0369	0,0676	0,0721

latitude	média	erro	$\sigma$
15,701°	0,0277	0,51%	0,0228
15,701°	0,0273	0,50%	0,0228
15,801°	0,0280	0,52%	0,0267

Tabela 9 – Diferença de valores entre Page em relação ao banco de dados do CRESESB para Brasília

método	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan	15,701°	4,9473	5,3552	5,0395	5,2663	5,5316	5,7112	6,0160	6,7386	5,9055	5,3349	4,6426	4,9152
	15,701°	4,9649	5,3458	5,0701	5,3341	5,6067	5,6979	5,8717	6,6288	5,8948	5,3638	4,7411	4,9152
	15,801°	4,9050	5,3662	5,0410	5,3025	5,5101	5,5960	5,9023	6,5962	5,8970	5,3654	4,6977	4,8910
Page	15,701°	4,9926	5,3759	5,0329	5,2366	5,5065	5,7019	6,0154	6,7462	5,8946	5,3467	4,6826	4,9663
	15,701°	5,0100	5,3666	5,0636	5,3054	5,5843	5,6880	5,8653	6,6337	5,8838	5,3754	4,7810	4,9663
	15,801°	4,9503	5,3867	5,0343	5,2732	5,4844	5,5819	5,8974	6,6003	5,8860	5,3769	4,7376	4,9421
LABREN	15°	5,0581	5,5030	5,1762	5,4473	5,5580	5,6280	5,8843	6,5708	5,9939	5,4528	4,7517	4,9831
	S	0,0913	0,0696	0,0736	0,0583	0,0501	0,0497	0,0601	0,0585	0,0615	0,0527	0,0473	0,0611

Tabela 10 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da LABREN para Brasília.

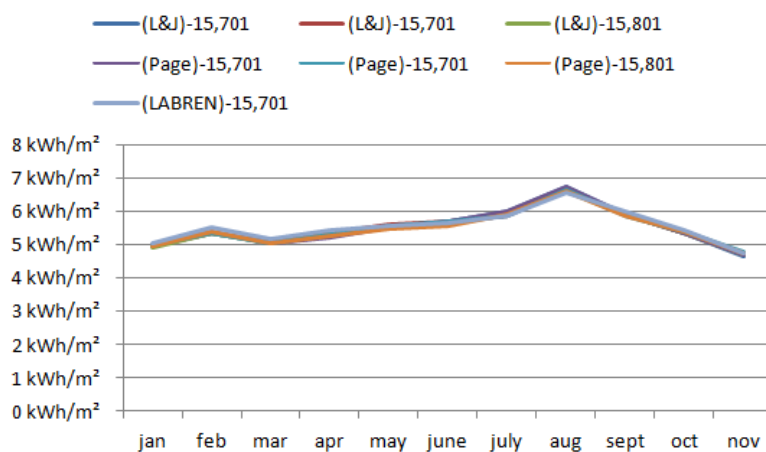


Figura 4 – Gráfico de relação de valores entre as irradiações no plano inclinado com os dados do LABREN para Brasília



comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan com LABREN	15,701°	0,1108	0,1478	0,1367	0,1810	0,0265	0,0832	0,1317	0,1678	0,0884	0,1179	0,1091	0,0679
	15,701°	0,0932	0,1572	0,1061	0,1132	0,0486	0,0699	0,0126	0,0581	0,0991	0,0890	0,0106	0,0679
	15,801°	0,1531	0,1368	0,1351	0,1448	0,0479	0,0320	0,0180	0,0254	0,0969	0,0873	0,0539	0,0921

latitude	média	erro	$\sigma$
15,701°	0,1141	2,07%	0,0416
15,701°	0,0771	1,40%	0,0401
15,801°	0,0853	1,55%	0,0473

Tabela 11 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da LABREN para Brasília

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Page com LABREN	15,701°	0,0655	0,1271	0,1432	0,2108	0,0515	0,0739	0,1311	0,1754	0,0993	0,1061	0,0691	0,0168
	15,701°	0,0481	0,1364	0,1126	0,1420	0,0262	0,0600	0,0190	0,0629	0,1101	0,0774	0,0293	0,0168
	15,801°	0,1078	0,1163	0,1418	0,1741	0,0736	0,0461	0,0131	0,0295	0,1079	0,0759	0,0141	0,0409

latitude	média	erro	$\sigma$
15,701°	0,1058	1,92%	0,0526
15,701°	0,0700	1,27%	0,0435
15,801°	0,0784	1,43%	0,0497

Tabela 12 – Diferença de valores entre Page em relação ao banco de dados da LABREN para Brasília

### 3.3 Fraiburgo

método	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan	27°	5,1459	5,0928	5,0361	4,5425	3,8741	3,6220	3,8786	4,6676	4,2665	4,6398	5,3153	5,3277
	27,101°	5,1484	5,1612	5,0173	4,5724	3,8791	3,6116	3,9315	4,6587	4,2692	4,6814	5,3612	5,3956
	27°	5,0953	5,1117	4,9817	4,5425	3,8591	3,6220	3,9101	4,6815	4,2549	4,6004	5,2807	5,3195
Page	27°	5,1272	5,0407	4,9478	4,4179	3,7258	3,4686	3,7329	4,5500	4,1543	4,5704	5,2899	5,3193
	27,101°	5,1295	5,1097	4,9283	4,4487	3,7310	3,4580	3,7879	4,5408	4,1568	4,6123	5,3358	5,3872
	27°	5,0763	5,0598	4,8921	4,4179	3,7104	3,4686	3,7654	4,5646	4,1426	4,5305	5,2550	5,3112
CRESESB	27°	5,09	5,04	4,99	4,50	3,84	3,58	3,85	4,63	4,21	4,58	5,26	5,27
	27,101°	5,09	5,11	4,97	4,53	3,84	3,57	3,89	4,61	4,21	4,62	5,31	5,34
	27°	5,04	5,06	4,94	4,50	3,82	3,59	3,87	4,64	4,20	4,54	5,23	5,27

Tabela 13 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da CRESESB para Fraiburgo

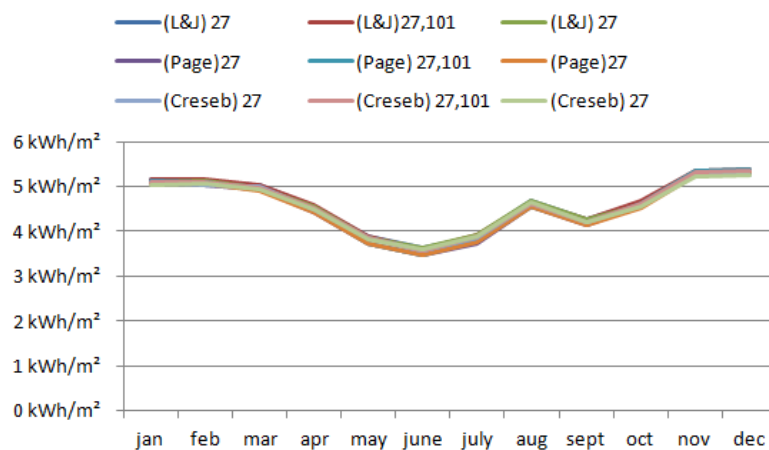


Figura 5 – Gráfico de relação de valores em comparação às irradiações no plano inclinado com os dados do CRESESB Fraiburgo

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan com CRESESB	27°	0,0559	0,0528	0,0461	0,0425	0,0341	0,0420	0,0286	0,0376	0,0565	0,0598	0,0553	0,0577
	27,101°	0,0584	0,0512	0,0473	0,0424	0,0391	0,0416	0,0415	0,0487	0,0592	0,0614	0,0512	0,0556
	27°	0,0553	0,0517	0,0417	0,0425	0,0391	0,0320	0,0401	0,0415	0,0549	0,0604	0,0507	0,0495

latitude	média	erro	$\sigma$
27°	0,0474	1,04%	0,0099
27,101°	0,0498	1,08%	0,0073
27°	0,0466	1,02%	0,0080

Tabela 14 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da CRESESB para Fraiburgo

comparação	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Page com CRESESB	27°	0,0372	0,0007	0,0422	0,0821	0,1142	0,1114	0,1171	0,0800	0,0557	0,0096	0,0299	0,0493
	27,101°	0,0395	0,0003	0,0417	0,0813	0,1090	0,1120	0,1021	0,0692	0,0532	0,0077	0,0258	0,0472
	27°	0,0363	0,0002	0,0479	0,0821	0,1096	0,1214	0,1046	0,0754	0,0574	0,0095	0,0250	0,0412

latitude	média	erro	$\sigma$
27°	0,0608	1,33%	0,0384
27,101°	0,0574	1,25%	0,0363
27°	0,0592	1,30%	0,0380

Tabela 15 – Diferença de valores entre Page em relação ao banco de dados da CRESESB para Fraiburgo

método	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
Liu & Jordan	27°	5,1459	5,0928	5,0361	4,5425	3,8741	3,6220	3,8786	4,6676	4,2665	4,6398	5,3153	5,3277
	27,101°	5,1484	5,1612	5,0173	4,5724	3,8791	3,6116	3,9315	4,6587	4,2692	4,6814	5,3612	5,3956
	27°	5,0953	5,1117	4,9817	4,5425	3,8591	3,6220	3,9101	4,6815	4,2549	4,6004	5,2807	5,3195
Page	27°	5,1272	5,0407	4,9478	4,4179	3,7258	3,4686	3,7329	4,5500	4,1543	4,5704	5,2899	5,3193
	27,101°	5,1295	5,1097	4,9283	4,4487	3,7310	3,4580	3,7879	4,5408	4,1568	4,6123	5,3358	5,3872
	27°	5,0763	5,0598	4,8921	4,4179	3,7104	3,4686	3,7654	4,5646	4,1426	4,5305	5,2550	5,3112
LABREN	27°	5,03	5,09	5,02	4,57	3,85	3,60	3,90	4,68	4,27	4,59	5,25	5,25
	S	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02

Tabela 16 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da LABREN para Fraiburgo

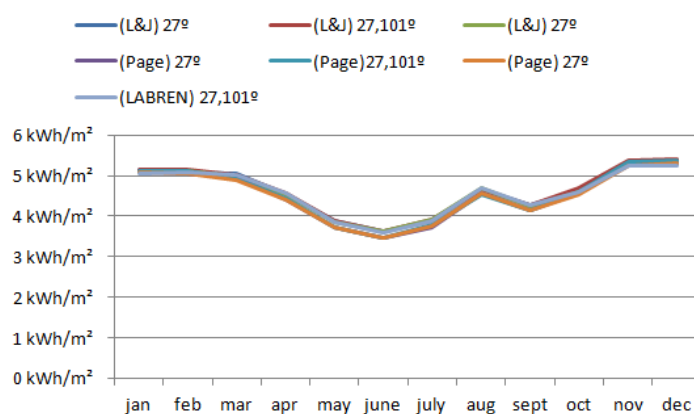


Figura 6 – Gráfico de relação de valores em comparação as irradiações no plano inclinado com os dados do LABREN para Fraiburgo

comparação Liu & Jordan com LABREN	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
	27°	0,1111	0,0048	0,0171	0,0311	0,0253	0,0222	0,0190	0,0158	0,0077	0,0508	0,0637	0,0805
	27,101°	0,1136	0,0732	0,0017	0,0012	0,0303	0,0118	0,0339	0,0247	0,0050	0,0924	0,1096	0,1484
	27°	0,0605	0,0237	0,0373	0,0311	0,0103	0,0222	0,0125	0,0019	0,0193	0,0114	0,0291	0,0723

latitude	média	erro	$\sigma$
27°	0,0374	0,81%	0,0313
27,101°	0,0538	1,17%	0,0491
27°	0,0276	0,60%	0,0199

Tabela 17 – Diferença de valores entre Liu e Jordan em relação ao banco de dados da LABREN para Fraiburgo

comparação Page com LABREN	latitude	jan	feb	mar	apr	may	june	july	aug	sept	oct	nov	dec
	27°	0,0924	0,0473	0,0712	0,1557	0,1230	0,1312	0,1647	0,1334	0,1199	0,0186	0,0383	0,0721
	27,101°	0,0947	0,0217	0,0907	0,1249	0,1178	0,1418	0,1097	0,1426	0,1174	0,0233	0,0842	0,1400
	27°	0,0415	0,0282	0,1269	0,1557	0,1384	0,1312	0,1322	0,1188	0,1316	0,0585	0,0034	0,0640

latitude	média	erro	$\sigma$
27°	0,0973	2,12%	0,0457
27,101°	0,1007	2,19%	0,0397
27°	0,0942	2,05%	0,0493

Tabela 18 – Diferença de valores entre Page em relação ao banco de dados da LABREN para Fraiburgo

### 3.4 Discussão dos Resultados

Dos resultados tabelados das comparações do banco de dados do CRESESB, ambos os métodos de Liu e Jordan quanto de Page, resultam em resultados com baixos erros. No entanto, é possível perceber que o equacionamento de Liu e Jordan é mais exato.

Em relação aos resultados amostrais do banco de dados da LABREN é possível perceber que, a equação de Liu e Jordan novamente apresenta maior exatidão. Para o caso de Brasília, a porcentagem de erro apresentada na equação de Liu e Jordan acaba sendo maior que a de Page. No entanto, o desvio padrão da equação de Page é maior (Tabelas 12 e 13), o que caracteriza maior variabilidade entre os erros avaliados. Portanto, não se pode concluir que Page foi melhor que Liu e Jordan nesta parte do estudo.

## 4 Conclusão

Ambos os métodos apresentados por Liu e Jordan e Page mostram resultados muito próximos aos bancos de dados SunData e Atlas Solarimétrico do Brasil. No entanto, as equações de Liu e Jordan apresentam menores erros. Mesmo que o equacionamento de Page eventualmente possua um grau de erro menor, as equações de Liu e Jordan demonstram um grau de incerteza menor. Desta forma, é possível ter uma melhor previsão de estimativa da quantidade de irradiação solar no plano inclinado a ser utilizado.

Em termos de projetos de engenharia, é possível concluir que uma estimativa mais exata das medições reais e com menor variabilidade de resultados, significa que temos melhor adequação do dimensionamento de projetos de sistemas fotovoltaicos em telhados com diferentes inclinações. Sejam em instalações de micro ou minigeração em telhados até em espaços grandes em gramados extensos em empresas. Então, é preferível que se use sempre a equação de Liu e Jordan (equação 7a).

Além disso, em termos de projetos arquitetônicos, hoje tem-se integrado muitos painéis solares em telhados. No entanto, a inclinação da superfície nem sempre será aideal. Conseqüentemente, não é possível sempre buscar as informações em banco de dados. Porém, utilizando a metodologia descrita com a entrada da irradiação no plano horizontal e junto com a latitude, é possível calcular qualquer estimativa para qualquer inclinação requerida para a montagem do sistema.

Vale ressaltar, por fim, que as duas metodologias avaliadas consideram a energia refletida pelo solo e pelas nuvens. Mas não consideram a existência do sombreamento de árvores, prédios e outros objetos ao redor que pode acabar interferindo na quantidade de energia solar final incidente no plano inclinado.

## 5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução no 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasil, Governo Federal, Ministério de Minas e Energia, , 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída (REN 482/2012) - Geração**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset\\_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_mJhnKli7qc](http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qc)>. Acesso em: 15 maio. 2018.

ANTONIOLLI, A. F.; SILVA DE ALMEIDA, J.; JUNIOR, E. M. Análise de um Sistema Fotovoltaico Compartilhado Aplicado a uma Edificação de Unidades Consumidoras Comerciais e Residenciais. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, p. 9, abr. 2018.

BUGS, R. C. **Radiasol 2 - Software para geração de dados horários de radiação solar** Porto Alegre Universidade Federal do Rio Grande do Sul, , 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/45987>>. Acesso em: 3 fev. 2020

CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 3 fev. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN\\_2019\\_Completo\\_WEB.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN_2019_Completo_WEB.pdf)>. Acesso em: 3 fev. 2020.

KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 19, n. 4, p. 325–329, 1977.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

SANTOS, Í. P. DOS. **Minicurso Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) para Arquitetos e Engenheiros Civis**, Recife, International Energy Initiative, , 2014. Disponível em: <<http://procobre.org/media-center/pt-br/component/jdownloads/send/2-publicacoes/88-minicurso-de-building-integrated-photovoltaics-bipv-para-arquitetos-e-engenheiros-civis.html>>. Acesso em: 19 nov. 2017