

# DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – SOFTWARE JAÍBA SOLAR

**Lucas Bacha Pereira Horta** – lucas.horta@ceienergetica.com.br

**Luís Guilherme Monteiro Oliveira** – luis.monteiro@ceienergetica.com.br

Companhia Energética Integrada (CEI), Departamento de Engenharia

**Marco Antônio Esteves Galdino** – marcoag@cepel.br

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), Eletrobrás

**Antonio Cesar Pinho Brasil Junior** - brasiljr@unb.br

Universidade de Brasília (UnB), Departamento de Engenharia Mecânica

**Gustavo Malagoli Buiatti** – gustavo@alsolenergia.com.br

ALSOL Energias Renováveis S.A.

**Resumo.** *O crescimento da energia solar fotovoltaica no país torna-se fundamental a utilização de softwares para o desenvolvimento de projetos, tanto para grandes usinas solares (para o atendimento aos recentes leilões) quanto para pequenos geradores através da geração distribuída. Estes softwares auxiliam o projetista na realização do dimensionamento dos sistemas bem como na previsão da energia gerada pelo mesmo e assim, obter uma perspectiva do tempo de retorno do investimento de forma a concretizar ou não o empreendimento solar. Neste trabalho, é apresentado o software Jaíba Solar, versão 1, que é uma ferramenta computacional desenvolvida no intuito de gerar informações energéticas para a realização da pré-viabilidade de projetos fotovoltaicos facilitando ao projetista analisar, de forma prévia, a geração de energia de um sistema, para qualquer localidade brasileira, e assim, tomar decisões para viabilização do mesmo. Dessa forma, foram estudados e implementados no software diversos modelos matemáticos, e suas incertezas, e realizadas simulações e comparações com os resultados gerados pelo software PVsyst 6.24.*

**Palavras-chave:** *Ferramenta Computacional, Comparação, Produção de Energia.*

## 1. INTRODUÇÃO

A previsão da energia gerada por um sistema fotovoltaico oferece um conhecimento do risco no projeto de uma usina solar fotovoltaica, seja uma central ou um micro gerador, o qual pode ser quantificado e qualificado, através do montante de incertezas envolvidas, com a estimativa. Segundo Schnitzer et al. (2012) em projetos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR), uma das áreas relevantes relacionada ao risco é a quantificação e a previsão da expectativa da produção de energia anual. Portanto, modelar e prever, com precisão, a produção de energia de sistemas fotovoltaicos tornou-se essencial para o desenvolvimento de qualquer projeto e também um desafio técnico devido à natureza estocástica dos parâmetros meteorológicos (ex: radiação solar, temperatura ambiente) e parâmetros intrínsecos aos equipamentos (módulos fotovoltaicos, inversores e etc).

Este trabalho apresenta o software Jaíba Solar, versão 1, que é uma ferramenta computacional desenvolvida no intuito de gerar informações energéticas para a realização da pré-viabilidade de projetos fotovoltaicos, para qualquer localidade brasileira, facilitando ao projetista analisar, de forma prévia, a geração de energia de um sistema, e assim, tomar decisões para viabilização do empreendimento. Nas próximas seções serão apresentados os modelos matemáticos estudados e implementados na ferramenta computacional, bem como, suas incertezas e as simulações realizadas e posteriormente comparadas com os resultados gerados pelo software PVsyst 6.24.

## 2. CONTEXTO – PROJETO JAÍBA SOLAR

O trabalho aqui proposto está inserido nas atividades relacionadas ao projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Jaíba Solar”. Este é um dos projetos oriundos da Chamada Estratégica N° 013/2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), denominada de “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” (Aneel, 2011). O projeto Jaíba Solar será concebido na cidade de Jaíba localizada ao norte do estado de Minas Gerais, à aproximadamente 200 km da cidade de Montes Claros (maior cidade do norte mineiro) e à 627 km da capital, Belo Horizonte. A planta fotovoltaica terá a capacidade instalada de 3MWp e serão implementados dois tipos de tecnologias fotovoltaicas, ou seja, a convencional, constituída de módulos de silício cristalino com quatro tipos de propostas de estrutura (ângulo de inclinação e orientação fixos, rastreamento solar eletrônico de um eixo, rastreamento solar eletrônico de dois eixos e rastreamento solar sazonal ajustável manualmente) e concentradores fotovoltaicos (“High Concentrator Photovoltaics” – HCPV, do inglês) compostos de células de tripla-junção, lentes e sistema de rastreamento do Sol em dois eixos. Para maiores informações sobre o projeto Jaíba Solar, a composição das instituições participantes, da planta e suas tecnologias e uma perspectiva do ganho de energia, através de simulações, para

cada uma das tecnologias e estruturas citadas ver em Junqueira et al. (2014) e/ou no site do projeto (<http://www.jaibasolar.com.br/o-projeto/>).

### 3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho proposto, foram estudados e implementados, em linguagem de programação PhP (“hypertext preprocessor”, do inglês), os seguintes modelos matemáticos: modelo polinomial para módulos fotovoltaicos (Zilles et al., 2012) / (Caamaño, 1998) e o modelo de eficiência de conversão c.c./c.a. (Jantsch, Schmidt e Schmid, 1992). Além destes modelos, foram também implementados os modelos para a decomposição da radiação solar global (Erbs et al., 1982) e de transposição, modelo anisotrópico HDKR (Hay (1979), Davies e Hay (1978), Klucher (1978) e Reindl (1988)) e utilizados os dados de irradiação global no plano horizontal (Global Horizontal Incidence – GHI, em inglês) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através do projeto SWERA (“Solar and Wind Energy Assessment”, em inglês) e dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Após a junção de todos estes modelos e informações no programa, foram implementados os cálculos da energia específica (Final Yield (kWh / kWp), do inglês), mensal e anual, e do rendimento anual global do sistema (Performance Ratio – PR (%), do inglês) bem como as diferentes perdas (incertezas), baseadas na literatura (Parker, 2011), que envolvem o processo de geração de energia para um sistema fotovoltaico. Finalmente, foram realizadas simulações e os resultados energéticos foram comparados com os resultados gerados, utilizando a mesma base de dados, pelo software PVsyst versão 6.24 (software amplamente utilizado no mercado para o desenvolvimento de projetos e simulações de sistemas fotovoltaicos). Nas próximas seções são apresentadas as descrições dos modelos utilizados, de forma sucinta e objetiva, e os resultados e comparações realizadas.

### 4. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NO SOFTWARE JAÍBA SOLAR

#### 4.1 Modelo polinomial de potência

Os principais fatores que modificam a potência produzida por um módulo fotovoltaico (FV), bem como os seus parâmetros elétricos característicos, ou seja, tensão e corrente são a irradiância incidente em seu plano e a temperatura de operação das células. A Eq. (1) mostra como pode ser calculada a máxima potência ( $P_{mp}$ ) do módulo fotovoltaico para uma determinada condição climática.

$$P_{mp} = P_{OFV} \frac{Ht, \beta}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_{c, ref})] \quad (1)$$

Onde:  $P_{OFV}$ : é a potência nominal do gerador fotovoltaico ( $W_p$ );  $Ht, \beta$ : é a irradiância solar incidente no plano do gerador FV ( $W/m^2$ );  $T_c$ : é a temperatura equivalente de operação das células FV ( $^{\circ}C$ );  $H_{ref}$ : é a irradiância solar de referência ( $1000 W / m^2$  para massa de ar igual a 1,5);  $T_{c, ref}$ : é a temperatura de célula de referência ( $25^{\circ}C$  para massa de ar igual a 1,5);  $\gamma_{mp}$ : coeficiente que relaciona a variação da potência no ponto de máxima potência com a temperatura.

A Eq. (2), de acordo com Zilles et al. (2012), mostra como é realizado o cálculo da temperatura de célula, obtida a partir da temperatura ambiente

$$T_c = T_a + Ht, \beta \left( \frac{T_{NOC} - 20^{\circ}C}{800 W.m^2} \right) . 0,9 \quad (2)$$

Sendo que:  $T_a$ : temperatura ambiente medida ( $^{\circ}C$ );  $T_{NOC}$ : temperatura nominal de operação da célula ( $^{\circ}C$ ).

Cabe salientar que o valor obtido pela Eq. (1) corresponde ao valor teórico ideal e não considera as perdas no processo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) representada por  $\eta_{spmp}$  onde, por ser um parâmetro difícil de ser modelado, foi adotado valores médios de acordo com a faixa de potência de operação c.c., ou seja, esses valores são, por exemplo, 98% para potências superiores a 20 % da potência nominal do inversor em c.c., e entre 80-90% para valores menores ou iguais a 20% da potência nominal do inversor em c.c.. Portanto, o valor mais realístico de potência c.c. entregue ao inversor pode ser obtido pela Eq. (3).

$$P_{mp} = P_{OFV} \frac{Ht, \beta}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_{c, ref})] . \eta_{spmp} \quad (3)$$

## 4.2 Modelo de eficiência de conversão

Para calcular a potência de saída do inversor, utilizou-se o modelo de eficiência de conversão proposto por Jantsch, Schmidt e Schmid (1992) o qual depende da potência de saída do conversor c.c. / c.a. O modelo mostra que a eficiência de conversão é uma função dependente do autoconsumo e do carregamento do equipamento. Com base nos efeitos físicos envolvidos, representados por  $k_0$ ,  $k_1$  e  $k_2$ , tem-se a Eq. 4.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + k_0 + k_1 * P_{saída} + k_2 * P_{saída}^2} \quad (4)$$

Onde:  $p_{saída} = P_{saída} / P_{oFV}$  é a potência normalizada com relação à potência nominal do inversor.

Sendo assim, os demais parâmetros no denominador da Eq. (4). quantificam as perdas operacionais de conversão do inversor, ou seja,  $k_0$  são as perdas por autoconsumo;  $k_1$  são as perdas por quedas de tensão nos diodos e dispositivos de chaveamento e  $k_2$  são as perdas ôhmicas. Os parâmetros  $k_0$ ,  $k_1$  e  $k_2$  são calculados através da Eq. (5), Eq. (6) e Eq. (7).

$$k_0 = \frac{1}{9} * \frac{1}{\eta_{inv1}} - \frac{1}{4} * \frac{1}{\eta_{inv0,5}} + \frac{5}{36} * \frac{1}{\eta_{inv0,1}} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{-4}{93} * \frac{1}{\eta_{inv1}} + \frac{33}{12} * \frac{1}{\eta_{inv0,5}} - \frac{5}{12} * \frac{1}{\eta_{inv0,1}} - 1 \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{20}{9} * \frac{1}{\eta_{inv1}} - \frac{5}{2} * \frac{1}{\eta_{inv0,5}} + \frac{5}{18} * \frac{1}{\eta_{inv0,1}} \quad (7)$$

Onde:  $\eta_{inv1}$ ,  $\eta_{inv0,5}$  e  $\eta_{inv0,1}$  são os valores da eficiência instantânea correspondentes à operação do inversor a 100%, 50% e 10% da potência nominal, respectivamente. Finalmente, reorganizando algebricamente a Eq. (4) teremos a Eq. (8).

$$P_{FV} = P_{saída} / \eta_{inv} = P_{saída} + (k_0 + k_1 * P_{saída} + k_2 * P_{saída}^2) \quad (8)$$

Onde:  $P_{FV}$  é a potência nominal do gerador fotovoltaico;  $P_{saída}$  é potência de saída do inversor.

A Eq. (8) é utilizada para o cálculo da potência de saída através dos modelos descritos anteriormente sendo que:  $P_{saída}$  é igual a  $P_{máx_{inv}}$  se  $P_{saída} \geq P_{máx_{inv}}$ ;  $P_{saída}$  é igual a 0 se  $P_{FV} \leq k_0 P_{o_{inv}}$  e  $P_{saída}$  é igual a  $P_{saída}$  se  $k_0 P_{o_{inv}} < P_{saída} < P_{máx_{inv}}$ .

A metodologia utilizada supõe que o inversor limita a potência de saída em sua potência máxima c.a. fornecida pelo fabricante. É importante salientar que, para algumas situações, a potência limite é utilizada como a própria potência nominal do inversor. Essa consideração é necessária em ocasiões as quais não se dispõe de informações a respeito dos valores máximos permissíveis para a operação do inversor em estudo, sem prejudicar sua integridade física.

## 4.3 Figuras de mérito para a avaliação do desempenho de SFCR

As figuras de mérito aqui propostas, são amplamente utilizadas como ferramentas práticas e de grande utilidade na análise de engenharia de SFCRs. As mesmas permitem analisar a operação de um sistema fotovoltaico com base em seus balanços energéticos. Abaixo segue uma breve descrição das figuras de mérito utilizadas no desenvolvimento do software.

## 4.4 Energia Específica / Produção Específica do Sistema (Final Yield - Y<sub>F</sub>)

De acordo com Zilles et al. (2012), dependendo do contexto da análise que se pretende fazer, existem diversas formas de se definir energia específica (EE) para sistemas fotovoltaicos, a EE tem por objetivo permitir a comparação da produção de energia de um SFCR de tamanhos e localizações diferentes. Para a aplicação fotovoltaica é comum o uso do termo produtividade específica do sistema (Final Yield - Y<sub>F</sub>, em inglês) para expressar a EE em kWh / kW<sub>p</sub>. Portanto, para um intervalo de tempo ( $t_2 - t_1$ ), a relação entre o valor médio da energia entregue à carga e a potência nominal do gerador é dada pela Eq. (9).

$$YF = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_{saída} \times dt}{P_{oFV}} \quad \left( \frac{kWh}{kWp} \right) \quad (9)$$

#### 4.5 Rendimento Global do Sistema (Performance Ratio – PR)

O rendimento global do sistema (Performance Ratio – PR, em inglês) considera todas as perdas envolvidas em um SFCR (gerador FV, inversor e outros elementos do sistema) e é definido pela Eq. (10).

$$PR = \frac{Y_F}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} H_{t, \beta} \times dt}{H_{ref}}} \quad (10)$$

Onde:  $Y_F$ , pode ser interpretado como o tempo de operação com a potência nominal do gerador FV, de modo a produzir a mesma quantidade de energia média fornecida à carga. De modo análogo, o denominador da Eq. (10) conhecido como reference yield ( $Y_r$ ), e é interpretado como o número de horas na irradiância a 1.000 W/m<sup>2</sup>.

#### 4.6 Modelos para a decomposição e transposição da radiação solar

Os modelos para a decomposição da radiação solar global foram desenvolvidos para realizar a previsão da radiação solar difusa utilizando dados medidos de radiação solar global em plano horizontal. Estes modelos são embasados em correlações matemáticas que utilizam parâmetros tais como: o índice de claridade ( $k_t$ ), o coeficiente difusa ( $k_D$ ) ou da transmitância direta ( $k_b$ ) sendo todas estas grandezas adimensionais. O modelo aqui estudado e implementado, denominado de modelo de Erbs, opera com essas correlações de forma a obter a radiação solar difusa sendo que a fração da difusa,  $k_D$ , é calculada através da Eq. (11), Eq. (12) e Eq. (13).

$$k_D = 1 - 0,09k_t \text{ para } k_t \leq 0,22 \quad (11)$$

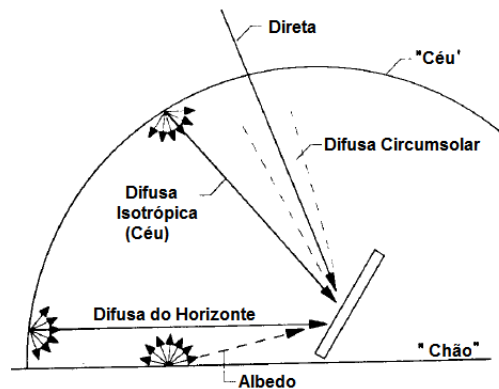
$$k_D = 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 + 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 \text{ para } 0,22 < k_t < 0,8 \quad (12)$$

$$k_D = 0,165 \text{ for } k_t > 0,8 \quad (13)$$

Para o cálculo da radiação solar global incidente em superfícies inclinadas é necessário conhecer as direções às quais as componentes direta e difusa chegam à superfície em questão considerando que a grande maioria dos dados disponíveis são em base mensal da radiação solar em plano horizontal. De acordo com Duffie e Beckman (2013) existem muitos modelos que tentam representar o céu e suas componentes direta, difusa e albedo em planos inclinados, denominados de modelos de transposição, sendo que os mais comumente utilizados e popularizados são os modelos isotrópicos e os anisotrópicos cuja a diferença entre eles está na forma como as três componentes são abordadas e no tipo de dados medidos que são requisitados para a realização dos cálculos (ex: dados de radiação solar global em plano horizontal).

Nos modelos isotrópicos, a soma da radiação solar difusa vinda do céu com o albedo, em uma superfície inclinada, é assumida como a mesma independentemente da orientação sendo assim, a radiação solar global em superfície inclinada é a soma da contribuição da radiação solar direta e a radiação solar difusa em plano horizontal. Tal consideração simplista mostra que toda a radiação solar pode ser considerada como radiação solar direta, porém, Liu e Jordan (1960) propuseram o modelo denominado de modelo “Difusa Isotrópico” o qual a radiação solar incidente em uma superfície inclinada é composta de três componentes, ou seja, radiação solar direta, radiação solar isotrópica difusa e o albedo.

Apesar do modelo “Difusa Isotrópico” ser simples de entender e de calcular a radiação solar global em superfície inclinadas, ele é conservativo e tende a subestimar (Gueymard, 2009) porém, modelos melhorados e mais complexos, denominados de modelos anisotrópicos, foram desenvolvidos os quais levam em conta as componentes do céu denominadas de difusa circumsolar e difusa do horizonte em superfícies inclinadas conforme mostra a Fig. 1.



Fonte: Adaptado Duffie e Beckman (2013).

Figura 1 – Distribuição das componentes da radiação solar direta, difusa e albedo.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo anisotrópico denominado de HDKR este método, que é uma junção e o aperfeiçoamento de diversos modelos, considera a fração da radiação solar difusa no horizonte, difusa circumsolar e

difusa isotrópica além de incorporar um índice denominado de índice anisotrópico (A) conforme mostram a Eq. (14) e Eq. (15).

$$A = \frac{G_{n,I}}{G} \quad (14)$$

$$Gt = (G_b + G_d A) R_b + G_d (1 - A) \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{G_b}{G}} \sin^3 \beta / 2 + G_p \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \quad (15)$$

Onde: G é a irradiação global; G<sub>b</sub> é a irradiação direta; G<sub>d</sub> é a irradiação difusa; G<sub>n,I</sub> é a irradiação incidente no plano normal; R<sub>b</sub> é o fator de escala geométrico; β é a inclinação em relação ao plano horizontal; G<sub>p</sub> é o albedo.

#### 4.7 Perdas (incertezas) incluídas

O PR depende de diversos fatores que incluem: localização da planta solar, condições climáticas e uma série de mecanismos de perdas sendo essas diferenciadas em: perdas por captura (L<sub>C</sub>) e perdas do sistema (L<sub>S</sub>). As perdas por captura são causadas por: atenuação da irradiação solar, dependência de temperatura, desacoplamento (“mismatching”), resistências parasitas nos módulos fotovoltaicos e imperfeições no rastreamento do ponto de máxima potência dentre outras. Já as perdas do sistema, são ocasionadas por perdas ôhmicas e perdas por conversão nos inversores / transformadores sendo que um bom projeto fotovoltaico leva em conta essas perdas e minimiza as perdas associadas aos diversos componentes do sistema. Uma das primeiras análises empíricas das perdas ocasionadas em um sistema fotovoltaico foi publicado por Decker e Jahn (1997) e Marion et al. (2005), um estudo geral, bem detalhado, e atual das perdas envolvidas é apresentado por Parker (2011) e Thevenard e Pelland (2013). As perdas (incertezas) incluídas no software foram baseadas no estudo desenvolvido por Parker (2011) e as mesmas estão listadas na Tab. (1).

Tabela 1- Perdas (incertezas) incluídas no software Jaíba Solar

Perdas (Incertezas)	%
Desacoplamento e espectrais	1,5
Diodos e Conexões	0,5
Cabeamento CC e CA	1
Sujeira e Poeira	4
Parâmetros elétricos módulo (“nameplate”)	3
Transformador	0,5
Sombreamento	2
Disponibilidade	1
Envelhecimento / ano	3

Cabe salientar que as perdas por temperatura e perdas por conversão c.c./c.a. já estão incluídas nos modelos matemáticos implementados no software Jaíba Solar.

## 5. O SOFTWARE JAÍBA SOLAR – VERSÃO 1

A Fig. 2 mostra tela do software Jaíba\_Solar, versão 1, que foi desenvolvido em PHP. Como descrito anteriormente, a ferramenta computacional é para o uso via Web e de fácil manipulação. O usuário seleciona qualquer localidade brasileira através do Google Maps<sup>®</sup> e rapidamente o software retorna com os resultados da simulação, ou seja, a estimativa da produção específica de energia (kWh/kWp), mensal e anual, e o valor do PR anual para um SFCR, pré-determinado.

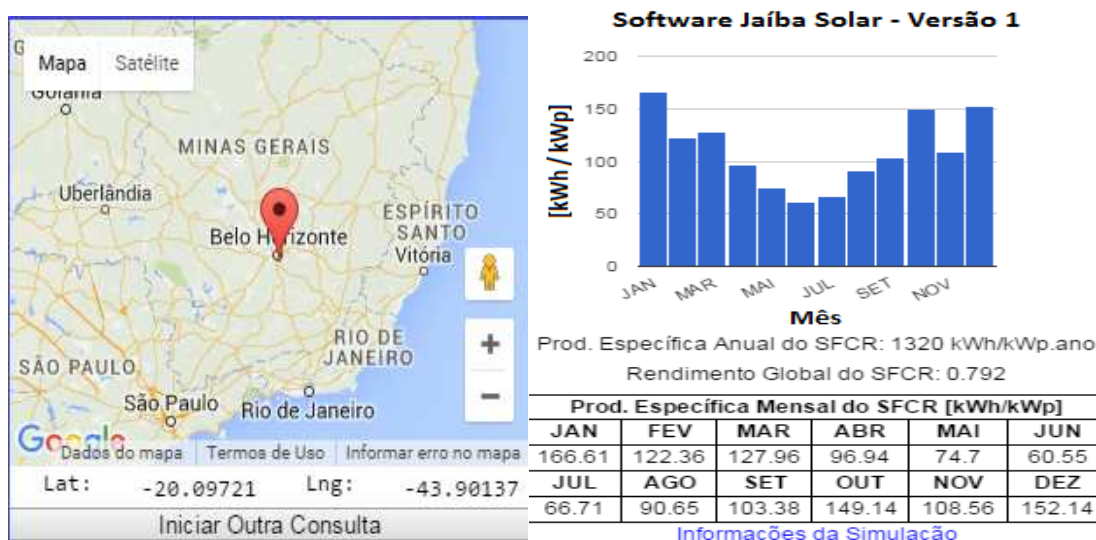


Figura 2 - Telas do software Jaíba Solar, versão 1.

### 5.1. Simulações / Comparação de resultados

De forma a verificar a coerência dos resultados energéticos encontrados pelas simulações no software Jaíba\_Solar versão 1, foram realizadas comparações, utilizando a mesma base de dados, com os resultados gerados por simulações no software PVSyst 6.24. Portanto, foi configurado, em ambos os softwares, um SFCR hipotético com capacidade instalada de 681 kWp constituído de 2.671 módulos FV de tecnologia de silício cristalino (Yingli Solar modelo YL255P-29b), montado no chão com orientação (azimute) para o norte geográfico e inclinação igual a 15° (simulação realizada inicialmente para a cidade de Jaíba-MG cuja a latitude é de 15°,35 ao sul), inversor (Ingeteam modelo 570TL Outdoor) e fator de dimensionamento (FDI) igual a 0,83. Os bancos de dados solarimétrico / meteorológico utilizados foram INPE / SWERA e INMET.

Após o dimensionamento foram realizadas simulações nos dois softwares sendo que os principais parâmetros analisados foram a produção específica, mensal e anual gerada, e o PR anual. A Tab. 2 mostra os resultados obtidos para Yield (mensal / anual).

Tabela 2 - Resultados obtidos para Yield (mensal / anual) para a cidade de Jaíba-MG.

Mês	Jaíba_Solar_v1 (kWh / kWp)	Pvsyst 6.24 (kWh / kWp)	Média (kWh / kWp)	Desvio Padrão
JAN	216,52	167,18	191,85	12,86%
FEV	174,43	147,03	160,73	8,52%
MAR	163,67	155,1	159,39	2,69%
ABR	135,29	151,43	143,36	5,63%
MAI	111,56	145,79	128,67	13,30%
JUN	90,95	125,09	108,02	15,80%
JUL	99,85	134,3	117,08	14,71%
AGO	124,73	149,35	137,04	8,98%
SET	157,97	160,14	159,05	0,68%
OUT	188,52	163,43	175,97	7,13%
NOV	164,51	134,66	149,59	9,98%
DEZ	154,67	126,56	140,62	10,00%
<b>ANO</b>	<b>1782,67</b>	<b>1760,06</b>	<b>1771,37</b>	<b>0,64%</b>

De acordo com a Tab. 2, é possível observar que, durante os meses do ano, o desvio padrão, calculado através de função específica do software Matlab© R2014, para a energia específica (kWh/kWp) apresentou uma variação entre 0,68% (mínimo) à 15,80% (máximo), ou seja, uma variação de 15,12%, ao longo do ano, sendo maior para os meses entre maio a julho. As produtividades específicas anuais foram de 1782,67 para o software Jaíba Solar e de 1760,00 para o PVSyst 6.24 sendo que o valor de 0,64% foi encontrado para o desvio padrão anual. A Fig. 3 mostra a produção específica mensal, e sua variação ao longo do ano para o SFCR considerado nesse estudo.

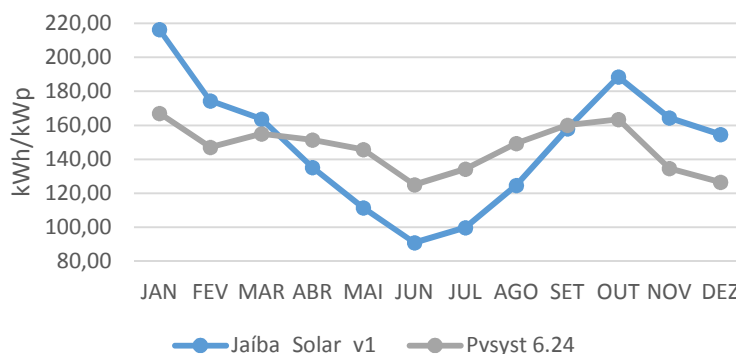


Figura 3 - Produção específica mensal do SFCR em Jaíba/MG para os softwares Jaíba Solar\_v1 e PVSyst 6.24.

Foram também realizadas simulações para diferentes cidades e comparados os PR's anuais conforme mostra a Tab. 3.

Tabela 3 - Resultados obtidos para PR (mensal / anual) para diferentes cidades.

Cidades	PR		Desvio Padrão
	Jaíba_V1	PVSyst	%
<b>Jaíba - MG</b>	0,805	0,809	0,2
<b>Belo Horizonte - MG</b>	0,793	0,814	1,1
<b>São Paulo - SP</b>	0,782	0,823	2,1
<b>Florianópolis - SC</b>	0,783	0,821	1,9
<b>Salvador - BA</b>	0,81	0,813	0,1
<b>Belém - PA</b>	0,811	0,809	0,1

De acordo com a Tab.3 os PR's anuais obtidos pelos softwares são bastante similares, com desvios padrões baixos mostrando assim, para base anual, a quase equivalência ou valores muito próximos, entre os dois softwares, dos resultados simulados para distintas cidades.

## 6. CONCLUSÕES

Este artigo teve como principal objetivo apresentar, o software Jaiba Solar, versão1, que é uma ferramenta computacional desenvolvida no intuito de gerar informações energéticas para a realização da pré-viabilidade de projetos fotovoltaicos, para qualquer localidade brasileira, facilitando ao projetista analisar, de forma prévia, a geração de energia de um sistema, e assim, tomar decisões para viabilização do mesmo.

As simulações realizadas com o software desenvolvido e seus resultados energéticos através das figuras de mérito técnico, ou seja, rendimento global do sistema (PR) e energia específica (Yield), em base anual, foram satisfatórios, em um primeiro momento, quando comparados com os resultados encontrados, para a mesma configuração do sistema, com o software PVSyst 6.24 apresentando valores de desvio padrão anuais baixos para os dois parâmetros analisados.

Porém, foi possível observar que o Yield mensal resultante, principalmente para os meses de dezembro e janeiro / de maio à julho os desvios padrões foram mais acentuados, acima de 10%. Tal fato, pode ocorrer como já constatado por estudos realizados por Yates e Hibberd (2010), Podewills (2011) e Axaopoulo et al. (2014) devido as diferentes incertezas e perdas que cada um dos softwares consideram em suas simulações, sendo difícil de padronizar todas elas, bem como na utilização de diferentes modelos matemáticos, que geram distintas incertezas, e, portanto, gerando diferentes resultados para a estimativa da produção de energia através de um sistema fotovoltaico.

Finalmente, é importante salientar que o software Jaíba Solar está em desenvolvimento e portanto, melhoras e a inclusão de novos recursos e cálculos, além de comparações e validações, serão realizadas de forma a obter um melhor retorno nos resultados gerados.

### Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito da Chamada Estratégica nº013/2011 (Aneel PE-0394-1113/2011 – Projeto Jaíba Solar) do Programa de P&D Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

## REFERÊNCIAS

- Axaopoulos, P.J., Emmanouil, D. F., Konstantinos, G. 2014. Accuracy analysis of software for the estimation and planning of photovoltaic installations. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. Springer, pp.1-7.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). 2011. Chamada N° 013: Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”. Brasília.
- Caamaño, M. C. Edificios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: Caracterización y Analisis. 1998. Tesis (Doctoral) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Departamento de Electrónica Física, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. 200 f.
- Davies, J. A., Hay, J. E. 1978. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. In *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop* (J. E. Hay and T. K. Won, eds.), pp. 32-58, April 17-19.
- Decker, B.; Jahn, U. 1997. “Performance of 170 grid connected pv plants in northern Germany—analysis of yields and optimization potentials,” *Solar Energy*, vol. 59, no. 4, pp. 127–133.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- Gueymard, C. 2009. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications *Solar Energy*, Vol. 83, No. 5, pp. 432-444.
- Hay, J.E. 1979. Calculation of monthly mean solar radiation on horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, Vol. 23, pp. 301–307.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2008-2010. Brasília/DF. Disponível em <http://www.inpe.br/>.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). 1961-1990 e 2009-2010. Brasília/DF, Disponível em <http://www.inpe.br/>.
- Jantch, M.; Schmidt, H.; Schmid, J. 1992. Results of the concerted actions on power Conditioning and Control. 11° European Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, Suíça,
- Junqueira, R., Monteiro, L., Galdino, M., Viloz, M., Godoy, N., Carneiro, M., 2014. Projeto Jaíba Solar: Desenvolvimento da Energia Solar no Brasil – Objetivos, Metodologia para Definição do Local de Instalação e Tecnologias Empregadas, V CBENS - V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife-PE.
- Klucher, T. M. 1978. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces, NASA TM-78842, NASA, Lewis Research Center, Cleveland, OH, March.
- Liu, B. Y. H, and R. C. Jordan. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy*, Vol. 10, No. 3, 4(3):1e19.
- Marion, B., Adelstein, J., Boyle, H., Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, D. Narang, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich. 2005. Performance parameters for grid-connected pv systems. In: *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005, pp. 1601–1606.
- Parker, D. 2011. Estimating uncertainty in the projected annual energy yield of a photovoltaics. Report: JPV-2011-07-0052-R.
- Podewills, C., 2011. Las perspectivas son buenas. El laboratorio de Photon ha examinado programas para la estimación del rendimiento. *Revista PHOTON*, p.46-49.
- Reindl, D. T. 1988. Estimating diffuse radiation on horizontal surfaces and total radiation on tilted surfaces, M.S. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Disponível em <http://en.openei.org/apps/SWERA/>.
- Schnitzer, M.; Thuman, C.; Johnson, P.; Freeman, J. 2012. *Solar Input Data for PV Performance Modeling*. AWS Truepower, LLC.
- Thevenard, D., Pelland, S. 2013. Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions. *Solar Energy*, Vol. 91, pp. 432-445.
- Yates, T., Hibberd, B. 2010. Production modeling for grid-tied pv systems. *SOLARPRO*. April/May 30-56.
- Zilles, R.; Macêdo, W.; Galhardo, M.; Oliveira, S. 2012. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica – Oficina de Idéias*, São Paulo - SP.

#### DEVELOPMENT OF COMPUTER TOOL FOR ESTIMATED ELECTRICITY ENERGY PRODUCTION THROUGH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS - JAÍBA SOLAR SOFTWARE

**Abstract.** *The growth of PV solar power in the country becomes fundamental the use of computer tools to development projects, for large solar plants (for compliance with recent auctions) and for small generators through distributed generation. These softwares help the designer in making the sizing of systems as well as in forecast energy output generated by it and thus, get a perspective payback time of the investment in order to realize or not the solar project. In this work, the Jaiba Solar software, version 1, is presented which is a computational tool developed in order to generate energy information for carrying out the pre-feasibility of photovoltaic projects facilitating the designer to analyze, beforehand, the power generation of a system, for any Brazilian locality, and thus make decisions for the viability of it. Thus, it was study and implemented various mathematical models in software, and their uncertainties, and conducted simulations and comparisons with the results generated by PVsyst 6.24 software.*

**Key words:** *Computational Tool, Comparison, Energy Production.*