

# EFEITO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS LOCAIS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE TECNOLOGIAS DISTINTAS

**Ricardo E. de A. Beltrão** – Ricardo\_beltrao@bol.com.br

**Chigueru Tiba** – tiba@ufpe.gov.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

**Resumo.** Este trabalho apresenta os resultados obtidos nas simulações feitas para a geração de energia elétrica por módulos das tecnologias silício monocristalino, silício policristalino, silício amorfo e películas finas submetidos às condições climáticas de Recife e Araripina no ano de 2006. As variáveis climáticas consideradas foram a irradiância solar global, a velocidade do vento, e a temperatura ambiente. Os valores das variáveis foram obtidos a partir dos dados coletados e disponibilizados pelo CPTEC/INPE. As simulações foram realizadas usando um software desenvolvido pelo grupo FAE da UFPE (Fontes Alternativas de Energia) baseado em um algoritmo que considera como modelo elétrico da célula/módulo fotovoltaico o modelo de cinco parâmetros. Foram realizadas comparações entre a energia produzida pelos módulos caso estivessem operando em Recife ou Araripina. Os resultados mostraram que para as quatro tecnologias avaliadas, houve uma perda da ordem de 8% na produção de energia elétrica quando o módulo opera em Recife. Estes resultados indicam a relevância das variáveis climáticas locais na geração de energia de Sistemas fotovoltaicos, e que este efeito deve ser considerado quando da definição do local de instalação de sistemas fotovoltaicos de grande porte.

**Palavras-chave:** Efeito das variáveis climáticas locais, Temperatura do módulo, Energia Fotovoltaica.

## 1. INTRODUÇÃO

A eletricidade fotovoltaica está se tornando em larga escala uma fonte de energia limpa para a Terra. Até 31.12.2007 as 25 maiores centrais fotovoltaicas que entraram em operação no mundo tinham uma potência de pico entre 5,04 a 20 MW, e a potência instalada acumulada dessas 25 maiores centrais era de 329,19 MW. Nos últimos três anos, o crescimento anual das grandes instalações fotovoltaicas alcançou quase 100% e espera-se que esta tendência continue em 2008. O tamanho das centrais fotovoltaicas também está aumentando, por exemplo, a central fotovoltaica de Brandis/Waldpolenz na Alemanha Oriental, em processo de implantação, tem uma capacidade prevista de 40 MWp. As células fotovoltaicas sofrem o efeito da temperatura e seu desempenho cai quando a temperatura da célula sobe, assim na célula solar mono-cristalino cada 1° C de aumento na temperatura acarreta uma perda da geração de energia elétrica de 0,4 – 0,5%. A temperatura do módulo fotovoltaico é função da temperatura ambiente, velocidade do vento, irradiância solar total, tecnologia da célula solar e a configuração da montagem dos módulos (rack aberto ou integrado ao prédio). Portanto, na medida em que as centrais FV crescem de tamanho a escolha de locais onde a temperatura do módulo poderá operar de 5 a 8°C mais baixo, terá impacto significativo no custo da eletricidade gerada. Considera-se nessa avaliação que os locais têm níveis similares de irradiação solar total, porém, diferentes perfis diários e valores de temperatura ambiente e velocidade do vento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Dados

Os dados usados neste trabalho foram coletados durante os meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro de 2006, pelo CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Brasil, para as localidades de Recife e Araripina, ambas situadas no Estado de Pernambuco. As variáveis climáticas utilizadas foram a irradiância solar global, a velocidade do vento na altura de 03 metros, e a temperatura ambiente. O mapa da Fig. 1 situa as localidades sob estudo.

### 2.2 Metodologia

Na metodologia empregada neste trabalho, a temperatura do módulo é calculada usando o modelo proposto por TamizhMani et al. (2002). Neste modelo a temperatura do módulo (na condição de instalação - módulo livre) é expressa pela Eq.(1) :

$$T_m = 0,943 \times T_a + 0,028 \times G_i - 1,528 \times Ws + 4,3 \quad (1)$$

onde,

$T_m$ , temperatura do módulo (°C)

$T_a$ , temperatura ambiente (°C)

$G_i$ , irradiância solar ( $W/m^2$ )

$W_s$ , velocidade do vento (m/s).

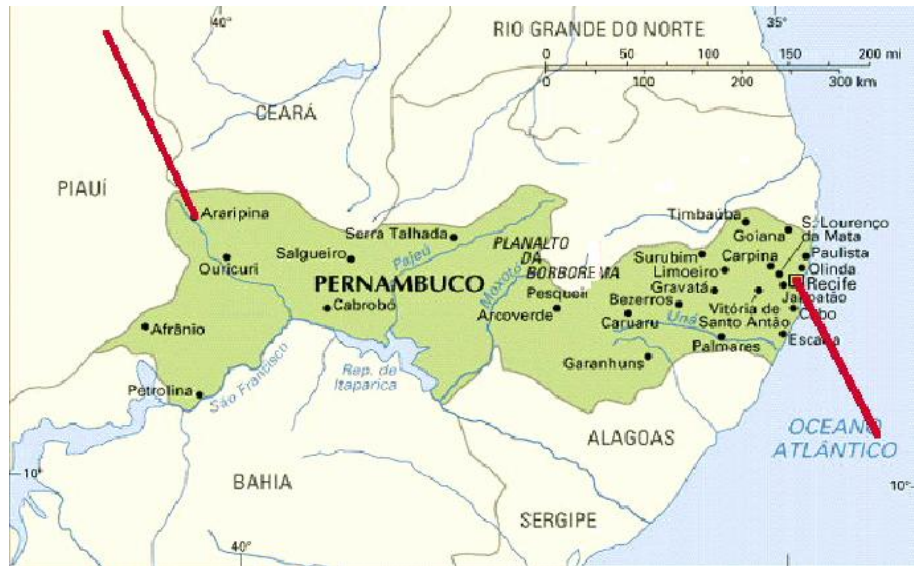


Figura 1- Mapa do Estado de Pernambuco com as localidades em estudo apontadas em vermelho

De posse da temperatura do módulo, estabelecida em função das condições climáticas locais, é traçada a curva corrente em função da tensão para o módulo fotovoltaico nas condições operacionais. O modelo elétrico usado para traçar a curva foi o modelo de cinco parâmetros (De Soto, 2004), por que permite modelar além das células das tecnologias silício monocristalino, policristalino, e películas finas a tecnologia do amorfo pela inclusão da resistência paralela. A Fig. 2 mostra o modelo elétrico da célula fotovoltaica com cinco parâmetros. Nesse modelo os cinco parâmetros são:

$I_L$ , corrente fotogerada;

$I_0$ , corrente reversa de saturação do diodo;

$R_{sh}$  resistência paralela;

$a$  parâmetro de idealidade do diodo;

$R_s$  resistência série.

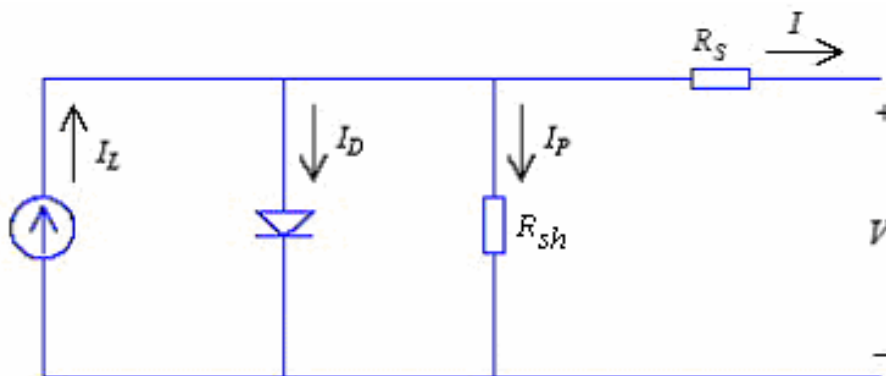


Figura 2 – Modelo elétrico da célula fotovoltaica com cinco parâmetros

Estes parâmetros são obtidos para a condição padrão de teste (STC), com dados provenientes dos catálogos dos fabricantes e resolvendo iterativamente a equação mostrada abaixo. O cálculo dos cinco parâmetros na condição STC é

descrito em detalhes em (Esberard, 2008). Obtidos os cinco parâmetros na condição STC a curva característica IxV para uma condição operacional qualquer pode ser obtida conforme Beltrão (2008).

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(V + IR_s)}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$a = \frac{\eta k T_c}{q} \quad (3)$$

onde:

$\eta$  fator de idealidade do diodo

k constante de Boltzmann

q carga do elétron

$T_c$  temperatura da célula

A partir da curva IxV é obtido o valor da potência elétrica gerada considerando que o módulo opera no ponto de máxima potência. O cálculo da energia elétrica gerada é feito em escala de tempo horária e posteriormente integrada para obter o valor diário, médio mensal. Este processo foi sistematizado em um software, de fácil aplicação cujo diagrama de blocos pode ser visto na Fig. 3.

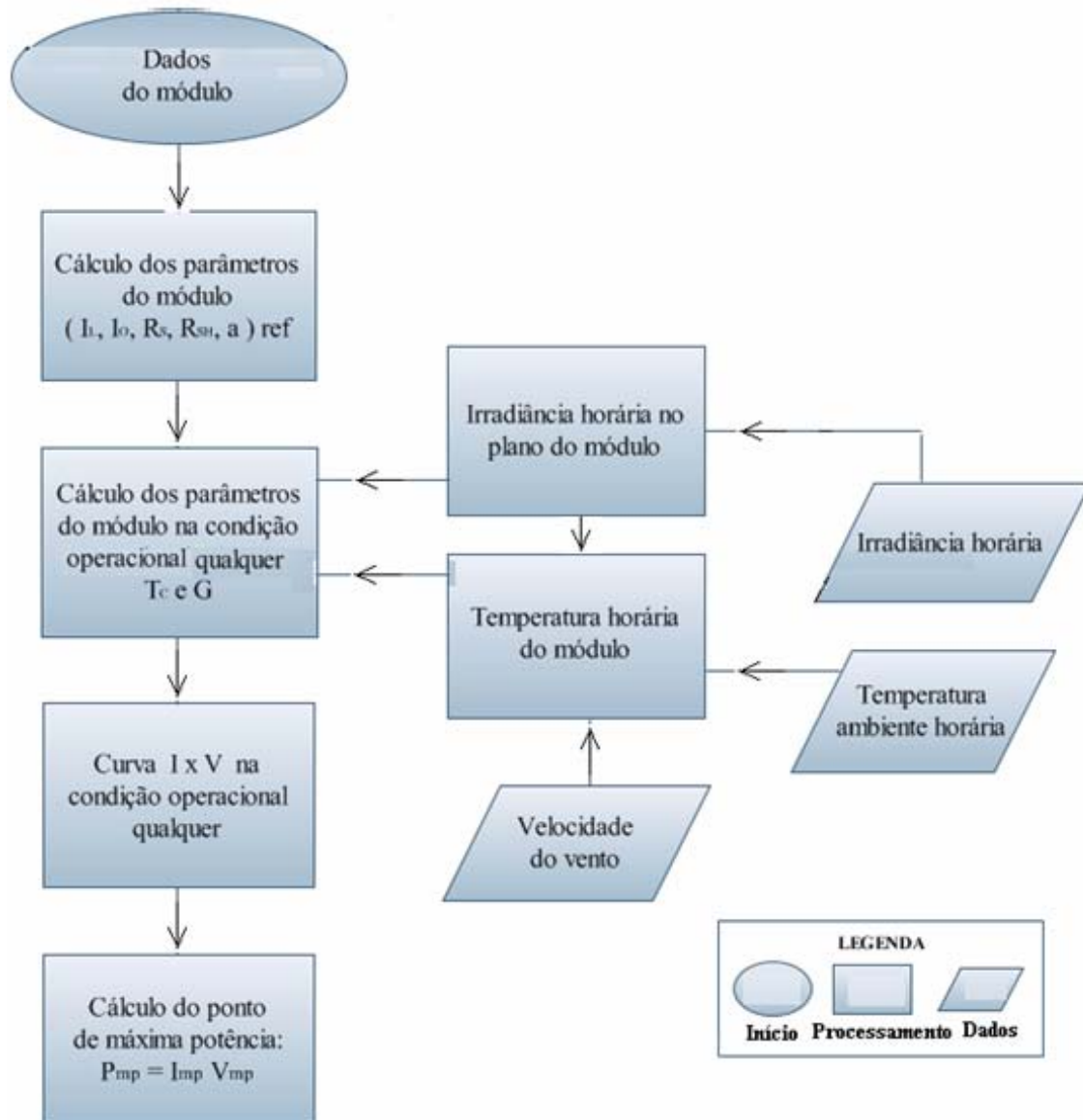


Figura 3 - Diagrama de blocos para cálculo da energia elétrica gerada pelo módulo

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Velocidade do vento

Os valores da velocidade do vento em intervalos sinóticos de três em três horas, medidos a 03 metros de altura pelas estações meteorológicas automáticas do CPTEC/INPE foram reduzidos para um valor diário médio mensal para as localidades de Recife e Araripina. Os resultados estão mostrados nas Figuras 4 a 7.

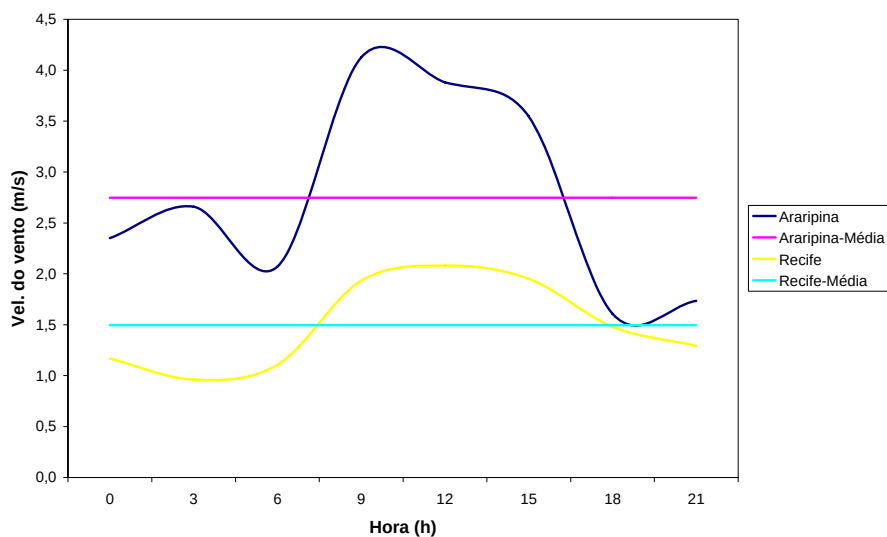


Figura 4 - Velocidade do vento para mês de Janeiro de 2006 para Recife e Araripina (dia médio mensal).

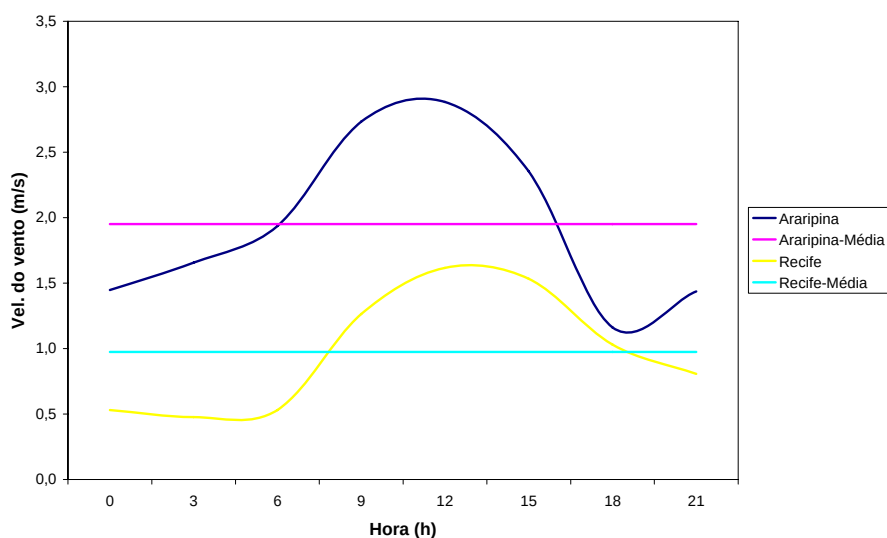


Figura 5 - Velocidade do vento para mês de Abril de 2006 para Recife e Araripina (dia médio mensal).

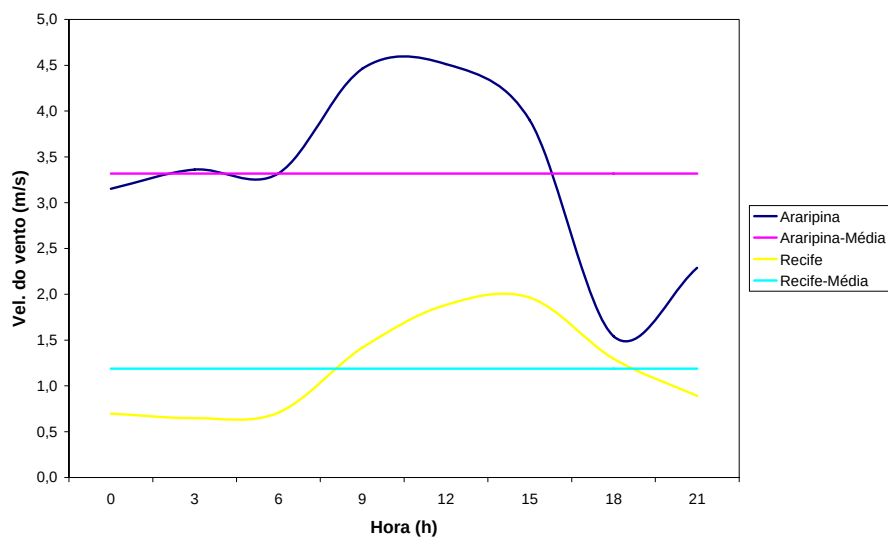


Figura 6 - Velocidade do vento para mês de Julho de 2006 para Recife e Araripina (dia médio mensal).

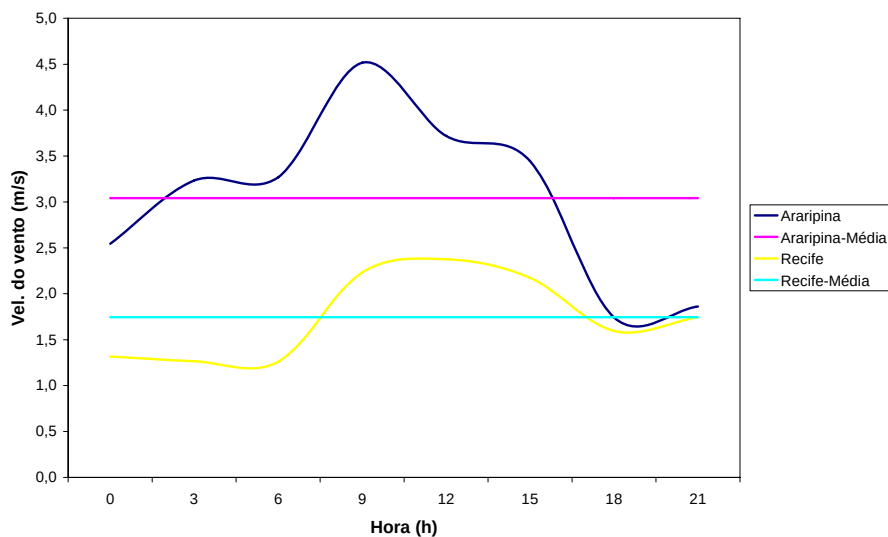


Figura 7 - Velocidade do vento para mês de Outubro para Recife e Araripina (dia médio mensal)

A análise das curvas permite concluir que Araripina possui velocidade do vento superior à Recife para todos os meses em estudo. Torna-se claro, também, que para as duas localidades, os ventos com maior velocidade estão concentrados na parte do dia com maiores níveis de irradiância. Este fato traz uma contribuição positiva na geração de energia elétrica, pois implica na atenuação da temperatura do módulo, nos momentos de maiores irradiâncias (próximos ao meio dia solar). A Tab. 1 apresenta de forma resumida a variação da velocidade do vento ao longo dos meses para as duas localidades.

Tabela 1- Valores diários, médio mensal da velocidade do vento para Recife e Araripina

| Mês     | Velocidade do vento              |        |               |
|---------|----------------------------------|--------|---------------|
|         | Valor diário, médio mensal (m/s) |        |               |
|         | Araripina                        | Recife | Diferença (%) |
| Janeiro | 2,7                              | 1,5    | 80            |
| Abril   | 1,9                              | 1,0    | 90            |
| Julho   | 3,3                              | 1,2    | 175           |
| Outubro | 3,0                              | 1,7    | 76,5          |

### 3.2 Temperatura ambiente

Os valores sinópticos da temperatura ambiente em intervalos de três em três horas foram utilizados para obtenção dos valores horários mediante interpolação com *cubic spline*. As curvas de temperatura ambiente média horária para Recife e Araripina para o mês de Janeiro de 2006 são apresentadas na Fig. 8.

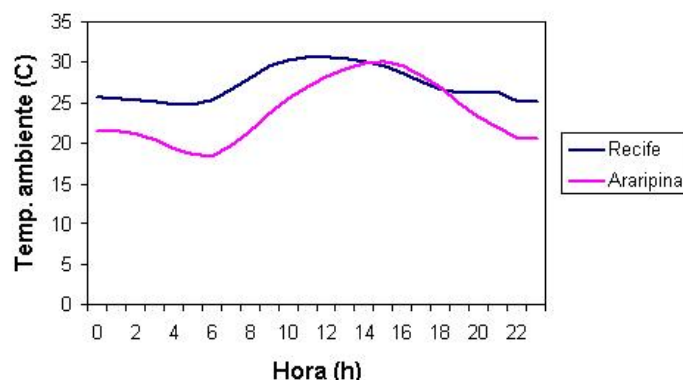


Figura 8 - Temperatura ambiente para Recife e Araripina – Valores horários médio mensal para Janeiro de 2006.

A análise destas curvas mostra que:

- A temperatura média de Araripina é inferior à de Recife.
- A curva de Araripina está deslocada para a direita, o que significa que Recife possui temperaturas mais altas nas horas de maiores irradiancias.

Conclui-se, portanto, que a variável temperatura ambiente contribuirá para que em Recife a temperatura do módulo seja mais elevada do que em Araripina, tendo como consequência uma menor produção de energia caso estejam submetidos à mesma irradiancia solar.

### 3.3 Irradiância solar global

De forma similar à temperatura ambiente, os valores da irradiancia solar medidos pelas estações meteorológicas do CPTEC/INPE estão em intervalos de três em três horas. Para se obter os valores horários, foi utilizado o programa CÉU LIMPO (Aguiar e Page, 2001), que permite obter os valores horários médio mensal a partir do valor diário médio mensal da irradiancia. A Fig. 9 mostra as curvas de irradiancia de um dia típico de Janeiro de 2006 para Recife e Araripina.

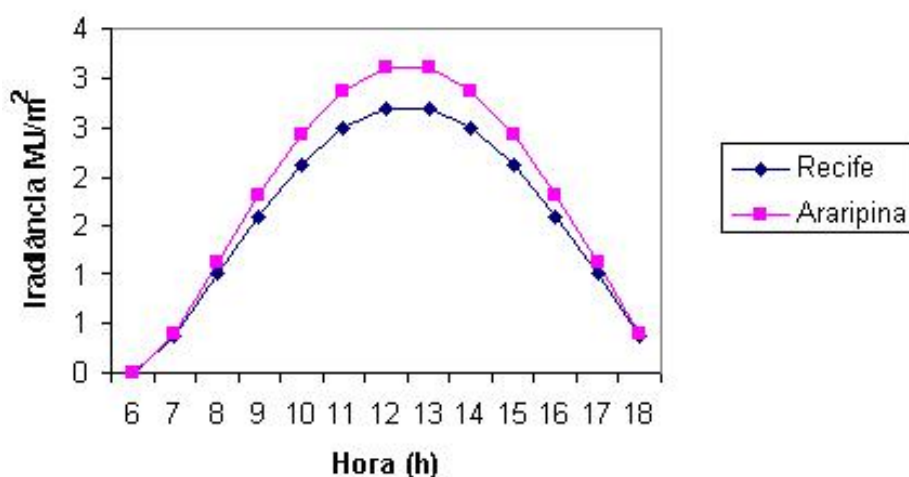


Figura 9 - Irradiância solar global horária para Recife e Araripina, Janeiro de 2006

A análise da figura mostra que Araripina possui valores de irradiancia solar horária superiores à Recife, o que contribuirá para uma maior produção de energia elétrica, caso o módulo venha a ser instalado nesta localidade e considerando-se apenas este aspecto.

### 3.4 Estimativa da energia elétrica produzida

Para verificar o efeito conjunto da irradiação solar, velocidade do vento e temperatura ambiente nas geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos foram realizadas simulações caso os módulos fossem instalados em Recife e Araripina. As tecnologias de células fotovoltaicas consideradas foram: silício mono e poli cristalinos, silício amorfo e células de películas finas (filme de silício policristalino). Todos os módulos foram supostamente instalados na configuração de rack livre e inclinado de 23° N. Esta inclinação foi usada com o objetivo de otimizar o valor irradiância ao longo do ano ( $23^\circ = 15^\circ + 8^\circ$ , sendo  $8^\circ$  a latitude das localidades sob análise). As características elétricas dos módulos fotovoltaicos são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2 - Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

| Módulo                 | Siemens SM55    | Solarex MSX-60  | Astropower APX-45 | Solarex MST-43LV(2) |
|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| Tecnologia             | Mono-cristalino | Poli-cristalino | Película fina     | Amorfo              |
| Área (m <sup>2</sup> ) | 0,425           | 0,556           | 0,566             | 0,822               |
| Células em série       | 36              | 36              | 40                | 16                  |
| Células em paralelo    | 01              | 01              | 01                | 04                  |
| $\eta$                 | 0,994           | 0,97            | 1,086             | 1,169               |
| $I_{L,ref}$ (A)        | 3,32            | 3,807           | 2,913             | 3,428               |
| $I_{0,ref}$ (A)        | 1,43E-9         | 1,31E-9         | 4,842E-9          | 9,899E-9            |
| $R_{s,ref}$ (ohms)     | 0,4088          | 0,3462          | 0,6102            | 1,19                |
| $R_{sh,ref}$ (ohms)    | 186,1           | 185,7           | 133,3             | 30,63               |

Os valores de energia elétrica estimados através das simulações são apresentados nas Tabelas 3 a 6.

Tabela 3 - Estimativa da energia elétrica produzida pelo módulo Siemens SM55

| MONOCRISTALINO<br>Siemens SM55 | Energia elétrica produzida (kJ) |       |        |         | Energia elétrica total (kJ) |
|--------------------------------|---------------------------------|-------|--------|---------|-----------------------------|
|                                | Janeiro                         | Abril | Julho  | Outubro |                             |
| RECIFE                         | 787,8                           | 841,5 | 804,7  | 957,3   | 3391,3                      |
| ARARIPINA                      | 909,2                           | 795,8 | 1028,5 | 998,1   | 3731,6                      |
| Diferença (%)                  |                                 |       |        |         | -10,0                       |

Tabela 4 - Estimativa da energia elétrica produzida pelo módulo Solarex MSX-60

| POLICRISTALINO<br>Solarex MSX-60 | Energia elétrica produzida (kJ) |       |        |         | Energia elétrica total (kJ) |
|----------------------------------|---------------------------------|-------|--------|---------|-----------------------------|
|                                  | Janeiro                         | Abril | Julho  | Outubro |                             |
| RECIFE                           | 889,4                           | 954,8 | 910,6  | 1078,1  | 3832,9                      |
| ARARIPINA                        | 1009,2                          | 892,8 | 1136,8 | 1106,4  | 4145,2                      |
| Diferença (%)                    |                                 |       |        |         | -8,1                        |

Tabela 5 - Estimativa da energia elétrica produzida pelo módulo Astropower APX-45

| SILÍCIO FINO<br>Astropower APX-45 | Energia elétrica produzida (kJ) |       |       |         | Energia elétrica total (kJ) |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------|-------|---------|-----------------------------|
|                                   | Janeiro                         | Abril | Julho | Outubro |                             |
| RECIFE                            | 662,8                           | 710,4 | 679,8 | 799,9   | 2852,9                      |
| ARARIPINA                         | 751,2                           | 669,0 | 847,8 | 820,8   | 3088,8                      |
| Diferença (%)                     |                                 |       |       |         | -8,3                        |

Tabela 6 - Estimativa da energia elétrica produzida pelo módulo Solarex MST-43LV(2)

| AMORFO<br>Solarex MST-43LV(2) | Energia elétrica produzida (kJ) |       |       |         | Energia elétrica total<br>(kJ) |
|-------------------------------|---------------------------------|-------|-------|---------|--------------------------------|
|                               | Janeiro                         | Abril | Julho | Outubro |                                |
| <b>RECIFE</b>                 | 666,3                           | 711,0 | 683,0 | 792,5   | 2852,8                         |
| <b>ARARIPINA</b>              | 748,7                           | 674,4 | 839,8 | 811,7   | 3074,6                         |
| Diferença (%)                 |                                 |       |       |         | -7,8                           |

Para todas as tecnologias de células fotovoltaicas analisadas há um ganho significativo (8 a 10%) na geração de energia elétrica caso o módulo seja instalado em Araripina. Este resultado está de acordo com o fato de que as condições climáticas são mais favoráveis nesta localidade do que em Recife: valor médio da irradiância superior, valor médio da temperatura ambiente inferior e valor médio de velocidade do vento superior, como já foi visto anteriormente. Para estimar o efeito isolado da irradiação solar global na energia elétrica gerada em Araripina e Recife foram feitas as simulações descritas na Tab. 7. Nas linhas 1 e 2 são feitas as simulações para Recife e Araripina considerando-se o efeito conjunto da irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Nas linhas 4 e 5 são feitas as simulações para Recife e Araripina considerando que o módulo opera a uma temperatura fixa de 25 °C. A comparação entre os resultados das linhas 2 e 1, mostrada na linha 3 resulta no benefício em termos energético da instalação do módulo em Araripina, devido ao efeito conjunto das variáveis climáticas. A comparação entre as linhas 5 e 4, mostrada na linha 6 resulta no benefício resultante em termos energético da instalação do módulo em Araripina, devido ao efeito isolado da irradiância solar. A diferença entre a linha 3 e 6 permite uma estimativa do efeito isolado benéfico da temperatura ambiente e velocidade de vento em Araripina. Cabe ressaltar que esta estimativa está subestimada na medida em que maior irradiância em Araripina significaria maior temperatura do módulo, mantidas invariáveis as condições de temperatura ambiente e velocidade de vento e, portanto, menor valor da linha 5.

Tabela 7 - Simulações para estimar o benefício isolado da irradiação solar global na geração da energia elétrica gerada em Araripina

|                                                         | Energia elétrica produzida (kJ) |       |        |         |        |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------|-------|--------|---------|--------|
|                                                         | Janeiro                         | Abril | Julho  | Outubro | Total  |
| <b>(1)</b> Efeito conjunto ( $G, T_a, v$ )<br>RECIFE    | 787,8                           | 841,5 | 804,7  | 957,3   | 3391,3 |
| <b>(2)</b> Efeito conjunto ( $G, T_a, v$ )<br>ARARIPINA | 909,2                           | 795,8 | 1028,5 | 998,1   | 3731,6 |
| Comparação <b>(2) : (1)</b> (%)                         | 15,4                            | -5,4  | 27,8   | 4,3     | 10,0   |
| <b>(3)</b> Temp. do módulo fixa (25°C)<br>RECIFE        | 878,2                           | 948,8 | 886,1  | 1082,5  | 3795,6 |
| <b>(4)</b> Temp. do módulo fixa (25°C)<br>ARARIPINA     | 995,2                           | 847,5 | 1100,0 | 1110,0  | 4052,7 |
| Comparação <b>(3) : (4)</b> (%)                         | 13,3                            | -10,7 | 24,1   | 2,5     | 6,8    |

### 3.5 Rendimento energético em função da temperatura do módulo

A Tab. 8 mostra o rendimento energético do módulo Siemens SM55 para os meses de janeiro, abril, julho e outubro de 2006 para Recife e Araripina. Em todos os meses analisados a temperatura do módulo é inferior em Araripina e por consequência o rendimento energético do módulo SM55 é superior nessa localidade. Observa-se também que no único mês em Araripina (abril) em que a irradiação solar mensal é menor que Recife, a diferença de rendimento energético é máxima em seu favor.



Tabela 8 - Rendimento energético do módulo Siemens SM55 para Recife e Araripina.

|       | Recife             |                     |                       |                | Araripina          |                     |                       |                |
|-------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
|       | Energia solar (kJ) | T <sub>m</sub> (°C) | Energia elétrica (kJ) | Rendimento (%) | Energia solar (kJ) | T <sub>m</sub> (°C) | Energia elétrica (kJ) | Rendimento (%) |
| Jan.  | 7140,00            | 39,8                | 787,80                | 11,03          | 8075,00            | 36,6                | 909,20                | 11,26          |
| Abril | 7722,25            | 41,5                | 841,50                | 10,90          | 6910,50            | 32,9                | 795,80                | 11,52          |
| Julho | 7220,75            | 37,8                | 804,70                | 11,14          | 8912,25            | 32,3                | 1028,50               | 11,54          |
| Out.  | 8772,00            | 41,5                | 957,30                | 10,91          | 8993,00            | 38,4                | 998,10                | 11,10          |

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram a relevância do efeito das variáveis climáticas locais na geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos. Para a tecnologia de silício mono-cristalino o benefício da instalação de um sistema fotovoltaico de grande porte em Araripina é de 10% na produção adicional de energia elétrica quando comparado com a sua instalação em Recife. Estima-se que 3,2% desse benefício sejam decorrentes das características mais favoráveis da temperatura ambiente e velocidade do e que 6,8% seja devido as melhores condições de irradiação solar. Com a escala crescente das centrais fotovoltaicas, hoje em dia já na faixa de 50 MWp, o estudo de localização focalizando as variáveis climáticas locais (irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento) como o realizado neste trabalho torna-se relevante e determinante para a viabilização econômica das mesmas.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco ( CHESF) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio ao projetos de pesquisas em energia solar que propiciaram meios materiais e ambiente científico para a realização dessa pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- Beltrão, R. E.; 2008. Efeito da temperatura na geração de energia de módulos fotovoltaicos submetidos a condições climáticas distintas. Estudo de caso para as localidades de Recife e Araripina, Dissertação de Mestrado, PROTEN, UFPE, Recife.
- De Soto, W. 2004. Improvement and validation of a model for Photovoltaic Array Performance. 235 p. (Master of Science Thesis) – Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 2004.
- Tamizhmani, G.; Tang, Y.; Petacci, L. 2002. Photovoltaic Module Thermal/wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating. Arizona State University East – National Renewable Energy Laboratory,
- Aguar, R. and Page J. 2001. European Solar Radiation Atlas, Chapter III, Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisboa, Portugal.

## THE EFFECT OF LOCAL CLIMATIC VARIABLES ON ELECTRIC ENERGY PRODUCTION BY PHOTOVOLTAIC MODULE OF DIFFERENT TECHNOLOGY

**Abstract.** The electric energy generated by photovoltaic module of different technology was evaluated, if by chance it were to be installed in Recife and Araripina, to represent the coastal region and the Brazilian Sertão of Pernambuco, respectively. The option to install the mono-crystalline silicon module in Araripina instead of Recife, implied an increase in performance of 10%, due to distinct local climatic conditions. The effect of the higher solar irradiation in Araripina only explains 6.8% of this result, the rest being the result of better ventilation conditions (higher wind velocities) and lower ambient temperature. Finally, simulations were carried out also for polycrystalline silicon, amorphous silicon and thin film cell technological modules. In this case the option to install the module in Araripina instead of Recife, implied an increase in performance of about 8%.

**Key words:** Siting PV Plant, Photovoltaic Conversion, Module Temperature