

ANÁLISE DIFERENCIAL DA POTÊNCIA MÁXIMA GERADA POR UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO¹

LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO², CAMILA PIRES CREMASCO³ & ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM⁴

RESUMO: A Terra recebe anualmente $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh de energia solar, o que corresponde a 1000 vezes o consumo mundial de energia nesse período. Esse fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia. Em muitas aplicações de pequena potência, sistemas que convertem diretamente a luz em eletricidade, chamados fotovoltaicos, substituem com vantagem outros meios de produção alternativos, onde a sua difusão é muito significativa. A determinação da potência gerada por um sistema deste tipo é de extrema importância para o dimensionamento energético de sua aplicação e também avaliação do próprio sistema. O presente trabalho tem o objetivo de determinar uma relação entre a potência máxima gerada pelo sistema solar fotovoltaico e parâmetros característicos do gerador. Tal relação permite avaliar o desempenho de tal sistema. Para simulações das equações desenvolvidas, foram utilizados 3 módulos fotovoltaicos com potência nominal de 100 Wp cada, e a coleta dos dados foi realizada durante um ano registrando-se, além de dados meteorológicos, a irradiância solar incidente nos módulos.

Palavras-chave: Energia solar, potência máxima, módulos fotovoltaicos.

¹ Parte da tese de doutorado do 1º autor intitulada: Análise e modelagem geométrica da potência gerada por um sistema híbrido solar fotovoltaico eólico.

² Docente do curso de Administração – CE/UNESP – Tupã/SP. gabrielfilho@tupa.unesp.br

³ Docente do curso Tecnologia em Agronegócio – FATEC – Presidente Prudente/SP. camila@fatec.edu.br.

⁴ Orientador e docente do Departamento de Engenharia Rural – FCA/UNESP – Botucatu/SP. seraphim@fca.unesp.br

DIFFERENTIAL ANALYSIS OF MAXIMUM POWER GENERATED BY A PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM

SUMMARY: *The Earth receives annually $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh of solar energy, which corresponds to 1000 times the world energy consumption in this period. This fact comes out that, besides being responsible for the maintenance of life on Earth, the solar radiation is in an inexhaustible energy source, with an enormous potential for use by systems capture and conversion into another form of energy. In many applications of low power systems that convert light directly into electricity, called photovoltaic advantageously replace other means of production processes, where its distribution is very significant. The determination of the power generated by such a system is of paramount importance for the design energy of its implementation and evaluation of the system itself. This study aims to determine a relationship between the maximum power generated by solar photovoltaic and characteristic parameters of the generator. This relationship allows to evaluate the performance of such a system. For simulations of the developed equations were used 3 photovoltaic modules with an output of 100 Wp each, and data collection was performed during one year by enrolling in addition to meteorological data, solar irradiance incident on the modules.*

Keywords: *Solar energy, maximum power, photovoltaic modules.*

1 INTRODUÇÃO

Para Lorenzo (1994), a energia solar fotovoltaica é a energia da conversão direta da luz em eletricidade. O efeito fotovoltaico é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão.

No Brasil, segundo Gabriel Filho (2007), a geração de energia elétrica por conversão fotovoltaica teve um impulso notável, através de projetos privados e governamentais, atraindo interesse de fabricantes pelo mercado brasileiro. A quantidade de radiação incidente no Brasil é outro fator muito significativo para o aproveitamento da energia solar.

A eletrificação rural é basicamente caracterizada pela grande dispersão geográfica da população, baixa consumo, alto investimento por consumidor e elevado custo operacional, quando comparada à eletrificação urbana, resultando em baixo retorno ou até mesmo em prejuízo financeiro à concessionária de

energia elétrica. No Brasil, já existem programas voltados à eletrificação rural via energias alternativas e existem resultados de avaliação e determinação da potência máxima de sistemas destes tipos de energia, tais como em Gabriel Filho (2008).

Segundo Oliveira (1997), para avaliar e comparar o desempenho de módulos fotovoltaicos são realizadas medições sob condições controladas, denominadas condições padronizadas. Controlando-se os parâmetros de funcionamento dos módulos, pode-se verificar se seu comportamento está de acordo com o esperado. Dessa forma, nas condições padronizadas, os módulos fotovoltaicos são caracterizados através de medidas da tensão de circuito aberto V_{OC} (para a corrente nula), da corrente de curto circuito I_{SC} (para a tensão nula) e do ponto de potência máxima P_{MAX} , caracterizado pela corrente e tensão no ponto de potência máxima, I_{MAX} e V_{MAX} , respectivamente, onde:

$$P_{MAX} = I_{MAX} \cdot V_{MAX} \quad (1)$$

A corrente gerada por um módulo fotovoltaico é obtida, segundo Lorenzo (1994), através da relação:

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + IR_s}{V_t}\right) \right] \quad (2)$$

Essa equação pode representar adequadamente o funcionamento de uma célula solar, mas apresenta alguns inconvenientes na sua utilização prática. A expressão possui um caráter implícito. A corrente I aparece de ambos os lados da equação, forçando a sua resolução através de métodos iterativos.

Como a determinação da potência máxima depende diretamente da corrente fotovoltaica pela Equação (1), o caráter implícito de I estende-se para a potência também. Por essa razão, convém desenvolver outros métodos cuja utilização requeiram exclusivamente o domínio de informações padronizadas.

O objetivo deste trabalho foi determinar, através de uma análise diferencial, uma relação entre a potência máxima gerada pelo sistema solar fotovoltaico e parâmetros característicos do gerador.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A parte experimental desta pesquisa foi desenvolvida no Núcleo de Energias Alternativas e Renováveis – NEAR do Laboratório de Energização Rural do Departamento de Engenharia Rural da UNESP, Faculdade Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental Lageado (Figura 1), localizada no município de Botucatu, São Paulo, com localização geográfica definida pelas coordenadas 22° 51' Latitude Sul (S) e 48° 26' Longitude Oeste (W) e altitude média de 786 metros acima do nível do mar. A velocidade média mensal do vento a 10 metros de altura é 3,1 m/s e a energia solar global média mensal diária é de 4772,13 Wh/m².



Figura 1 - Vista panorâmica do NEAR e da instalação do sistema híbrido eólico fotovoltaico.

Para a geração de energia elétrica a partir da energia solar incidente no local, foram utilizados três módulos fotovoltaicos I-100 da ISOFOTON com potência nominal de 100 Wp cada, perfazendo um total de 300 Wp instalados (Figura 2). Os módulos foram conectados em paralelo para elevação da corrente, mantendo a mesma tensão de saída, conforme indica as especificações da Tabela 1.



Figura 2 - Módulos fotovoltaicos de 100 Wp cada, instalados em paralelo e constituindo o painel fotovoltaico.

Tabela 1 - Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos utilizados no sistema híbrido.

Especificações do Módulo I-100/12	
Física	
Dimensões	1310 mm × 654 mm × 39,5 mm
Número de células em série	36
Número de células em paralelo	2
Área de células do módulo	0,72 /m ²
TONC (800 W/m ² , 20 °C, AM 1,5, 1 m/s)	47 °C
Elétricas (1000 W/m², 25 °C célula, AM 1,5)	
Tensão nominal	12 V
Potência máxima	100 Wp ± 10 %
Corrente de curto-circuito	6,54 A
Tensão de circuito aberto	21,6 V
Corrente de potência máxima	5,74 A
Tensão de potência máxima	17,4 V

2.2 Métodos

Os dados elétricos e meteorológicos obtidos foram organizados por períodos de observação agrupados e tabelados por estações do ano, no período compreendido entre 15/09/2004 a 14/09/2005.

Um sistema de aquisição de dados meteorológicos e elétricos foi programado para efetuar leituras a cada 10 segundos e fazer médias e totalizações dos valores lidos a cada 5 minutos. A coleta dos dados foi realizada durante um ano, diuturnamente, para avaliar a influência das horas do dia e da sazonalidade na geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico e seus componentes. Na maioria dos dados que foram tabelados, foi feita uma média diária. Os dados coletados foram utilizados nas simulações com relações desenvolvidas neste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados teóricos

Segundo Castro (2007), nas células fotovoltaicas, observa-se uma queda de tensão no circuito até os contatos exteriores, a qual pode ser representada por uma resistência série R_s . Do mesmo modo, também existem correntes de fuga, que podem ser descritas por uma resistência paralelo R_p . O circuito elétrico equivalente é o que se representa na Figura 3.

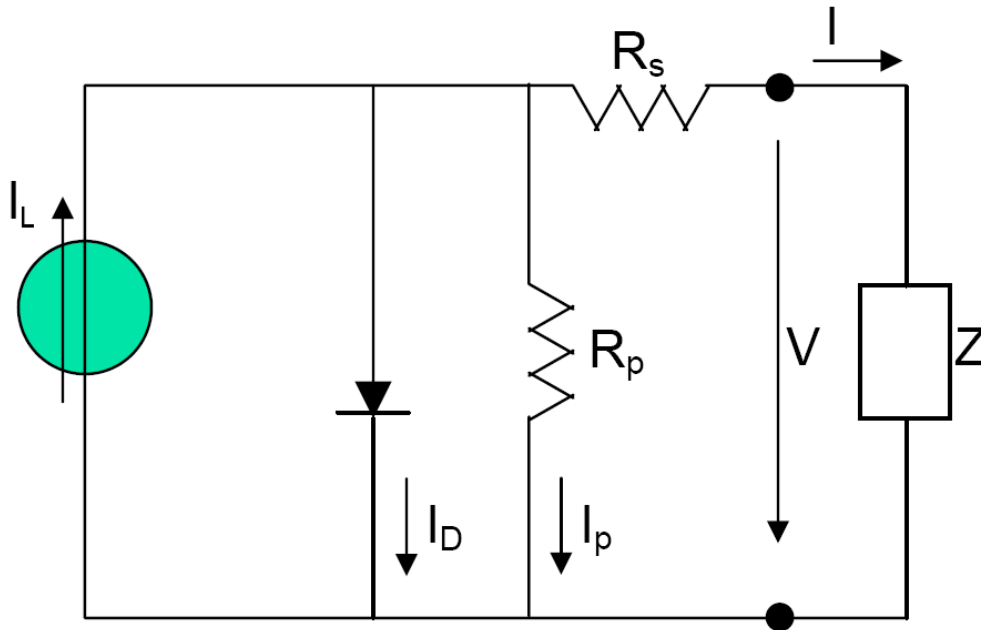


Figura 3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z .

A corrente de iluminação (ou fotogerada) I_L decorrente das cargas geradas pela iluminação do material e representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fótons, ao atingir a superfície ativa da célula (efeito fotovoltaico). Esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. A *junção p-n* funciona como um diodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V nos terminais da célula.

A relação entre a corrente (I) e a tensão (V) em uma célula fotovoltaica, conforme Lorenzo (1994), é dada por:

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t}\right) \right], \quad (3)$$

onde V_t é a tensão térmica, R_s é a resistência série, V_{oc} é a tensão de circuito aberto e I_{sc} é a corrente de curto circuito.

Para as zonas de tensões próximas ao ponto de potência máxima ou quando $V < 0,8 V_{OC}$, obtém-se uma razoável aproximação fazendo $I = I_{SC}$ no segundo membro da equação. Assim, tendo em vista estas considerações, tem-se que:

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I_{SC} R_S}{V_t}\right) \right]. \quad (4)$$

O teorema a seguir estabelece condições de determinação da potência máxima de uma célula fotovoltaica.

Teorema 1 - A potência máxima (P_{MAX}) de uma célula fotovoltaica é dada por:

$$P_{MAX} = \frac{V_{OC} I_{SC} - R_S I_{SC}^2 - V_t I_{SC} \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)}{1 + \frac{V_t}{V_{OC}}} \quad (5)$$

Demonstração

Como $P = VI$ e por (4), tem-se que:

$$P = V \cdot I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I_{SC} R_S}{V_t}\right) \right]. \quad (6)$$

Logo, podemos escrever:

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dV} &= \frac{d \left[V \cdot I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] \right]}{dV} = \\
&= I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] + V \cdot \frac{d \left[I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] \right]}{dV} = \\
&= I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] - \left(\frac{V \cdot I_{sc}}{V_t} \right) \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) = \\
&= I_{sc} \left[1 - \left(1 + \frac{V}{V_t} \right) \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] \Rightarrow \\
\frac{dP}{dV} &= I_{sc} \left[1 - \left(1 + \frac{V}{V_t} \right) \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] \quad (7)
\end{aligned}$$

O ponto de potência máxima P_{MAX} pode ser determinado fazendo:

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dV} = 0 &\Rightarrow I_{sc} \left[1 - \left(1 + \frac{V}{V_t} \right) \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) \right] = 0 \Rightarrow \\
\left(1 + \frac{V}{V_t} \right) \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} \right) &= 1 \Rightarrow \frac{V - V_{oc} + I_{sc} R_s}{V_t} = \ln \left(1 + \frac{V}{V_t} \right)^{-1} \Rightarrow \\
V &= V_{oc} - I_{sc} R_s - V_t \ln \left(1 + \frac{V}{V_t} \right) \quad (8)
\end{aligned}$$

Como $V_{oc} > V_{MAX}$, não há perda de generalidade em fazer $V = V_{oc}$ no segundo membro desta equação. Desta maneira, tem-se que:

$$V_{MAX} = V_{oc} - I_{sc} R_s - V_t \ln \left(1 + \frac{V_{oc}}{V_t} \right) \quad (9)$$

Logo, a corrente no ponto de potência máxima é dada por:

$$\begin{aligned}
 I_{MAX} &= I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V_{MAX} - V_{OC} + I_{SC}R_S}{V_t}\right) \right] = \\
 &= I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V_{OC} - I_{SC}R_S - V_t \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right) - V_{OC} + I_{SC}R_S}{V_t}\right) \right] = \\
 &= I_{SC} \left[1 - \exp\left(-\ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)\right) \right] = I_{SC} \left(\frac{V_{OC}}{V_t + V_{OC}}\right) \Rightarrow \\
 I_{MAX} &= I_{SC} \left(\frac{V_{OC}}{V_t + V_{OC}}\right) \tag{10}
 \end{aligned}$$

Portanto, pelas equações acima, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 \frac{P_{MAX}}{V_{OC} I_{SC}} &= \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{V_{OC} I_{SC}} = \left(\frac{V_{MAX}}{V_{OC}}\right) \left(\frac{I_{MAX}}{I_{SC}}\right) = \\
 &= \frac{\left(1 - \frac{R_S I_{SC}}{V_{OC}}\right) \left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) - \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)}{1 + \frac{V_{OC}}{V_t}} = \frac{\left(\frac{V_{OC} - R_S I_{SC}}{V_{OC}}\right) \left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) - \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)}{\frac{V_t + V_{OC}}{V_t}} = \\
 &= \frac{V_{OC} - R_S I_{SC} - V_t \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)}{V_t + V_{OC}} \Rightarrow P_{MAX} = \frac{V_{OC} I_{SC} - R_S I_{SC}^2 - V_t I_{SC} \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)}{1 + \frac{V_t}{V_{OC}}} \\
 &\tag{c.q.d.}
 \end{aligned}$$

3.2 Resultados práticos

Para o sistema fotovoltaico, temos que o gerador é constituído de 3 módulos em paralelo e cada módulo é formado por 72 células, agrupadas da forma de 36 em série e duas em paralelo. Para o presente estudo, foi necessário determinar alguns valores característicos do sistema fotovoltaico em relação à célula fotovoltaica, ao módulo fotovoltaico e ao gerador fotovoltaico (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores característicos da célula, módulo e gerador fotovoltaico calculados na condição padrão de operação.

Valores Característicos	Célula	Módulo	Gerador
Área Ativa (A_A)	0,01	0,72	2,16
Tensão de Circuito Aberto (V_{OC})	0,6	21,6	21,6
Corrente de Curto Circuito (I_{SC})	3,27	6,54	19,62
Tensão de Potência Máxima (V_{MAX})	0,4833	17,4	17,4
Corrente de Potência Máxima (I_{MAX})	2,87	5,74	17,22
Potência Máxima (P_{MAX})	1,3889	100	300
Resistência Série (R_S)	0,0229	0,4131	0,1377
Tensão Térmica (V_T)	0,0257	0,9250	0,9250

Tabela 3 - Temperatura Ambiente Média no período de 15/09/2004 a 14/09/2005.

Períodos	Datas	Estações do Ano	Temperatura Ambiente Média (°C)
P1	15/09/2004 a 14/10/2004		20,82
P2	15/10/2004 a 14/11/2004	Primavera	20,38
P3	15/11/2004 a 14/12/2004		21,51
P4	15/12/2004 a 14/01/2005		22,26
P5	15/01/2005 a 14/02/2005	Verão	21,64
P6	15/02/2005 a 14/03/2005		23,5
P7	15/03/2005 a 14/04/2005		23,07
P8	15/04/2005 a 14/05/2005	Outono	20,1
P9	15/05/2005 a 14/06/2005		19,97
P10	15/06/2005 a 14/07/2005		17,5
P11	15/07/2005 a 14/08/2005	Inverno	17,65
P12	15/08/2005 a 14/09/2005		19,93
Média	-	-	20,69
Desvio Padrão	-	-	1,87
Coefficiente de Variação	-	-	9,05%

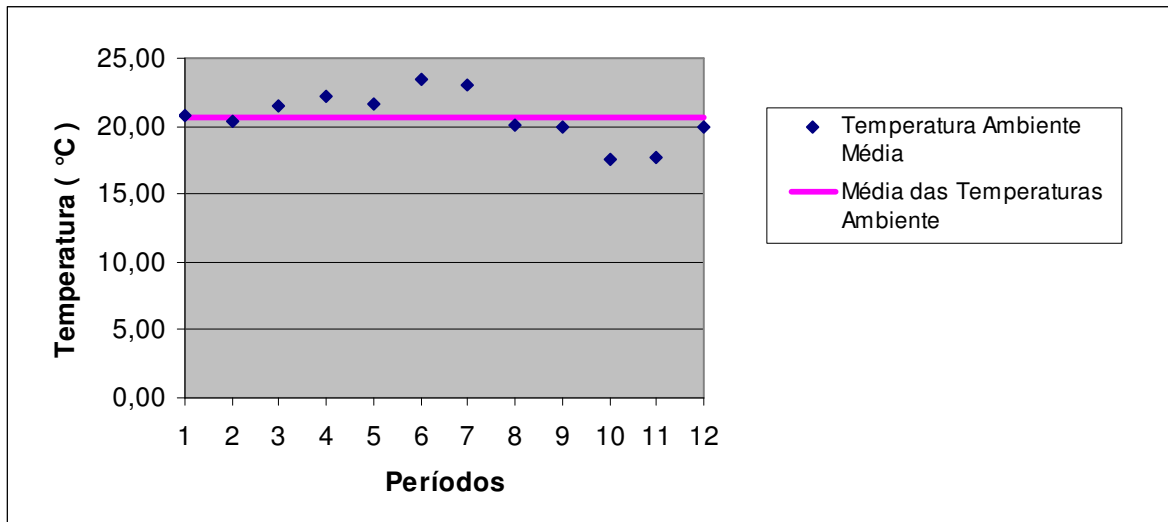


Figura 4 - Temperatura Ambiente Média durante os períodos de observação.

Para a caracterização do sistema fotovoltaico, no sentido de determinar uma relação da potência máxima que tal sistema pode atingir em função de uma irradiância qualquer, fixou-se a variável T_A como a média da temperatura ambiente média de cada período de observação (Tabela 3), ou seja, $T_A = 20,69 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme ilustra a Figura 4. Esta caracterização considera, portanto, todos os períodos de observação do estudo, o que faz com que possamos considerar a função potência máxima assim determinada, como uma função que represente o sistema fotovoltaico em todo o ano estudado. Assim, obtemos a potência máxima do gerador fotovoltaico em função somente de g (Figura 5), dada analiticamente por:

$$P_{MAXG} = 216.g \cdot \left[\frac{(-4580.g + 12164209) + (-3.g - 505265) \ln\left(\frac{-747164.g + 6352370621}{29086.g + 253240621}\right)}{-747164.g + 6352370621} \right]$$

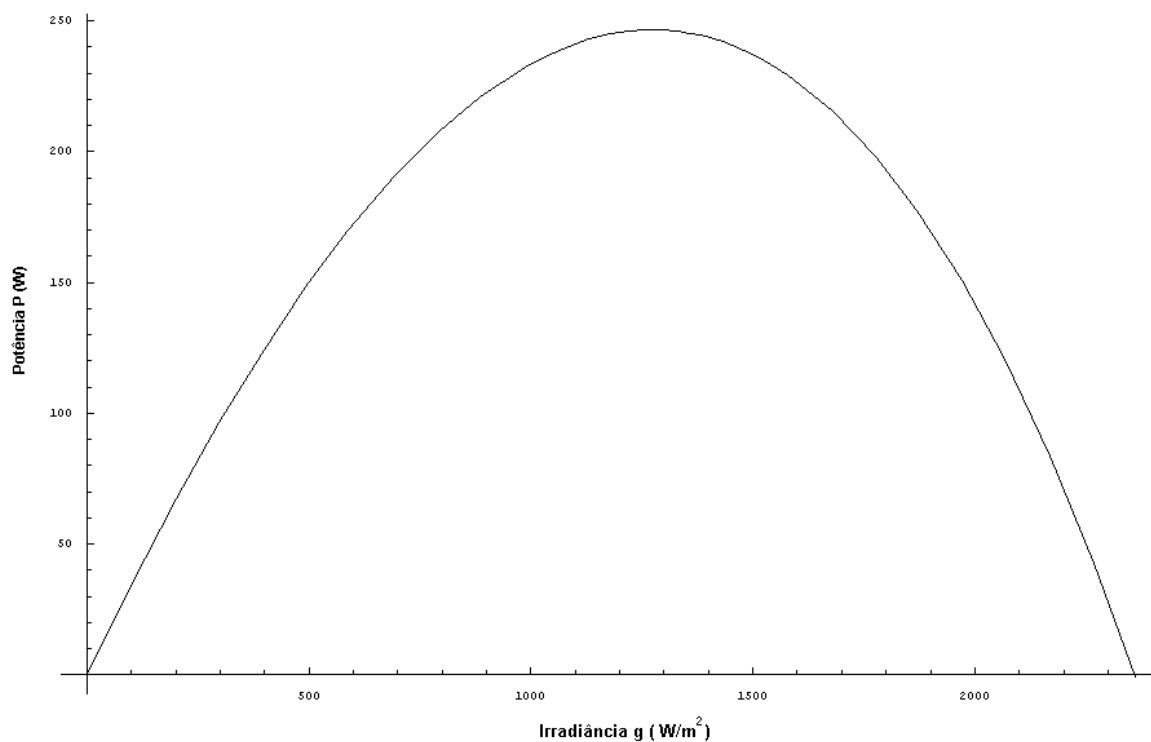


Figura 5 - Curva da potência máxima do gerador fotovoltaico em função da irradiância.

Desta forma, foi possível analisar o comportamento do gerador fotovoltaico e realizar o estudo acima sobre a potência produzida e a irradiância durante o período em estudo. A Figura 6 representamos os dados observados durante o primeiro período de observação (15/09/2004 a 14/10/2004) e a curva de potência máxima do gerador fotovoltaico obtido analiticamente para efeito de comparação com os dados observados.

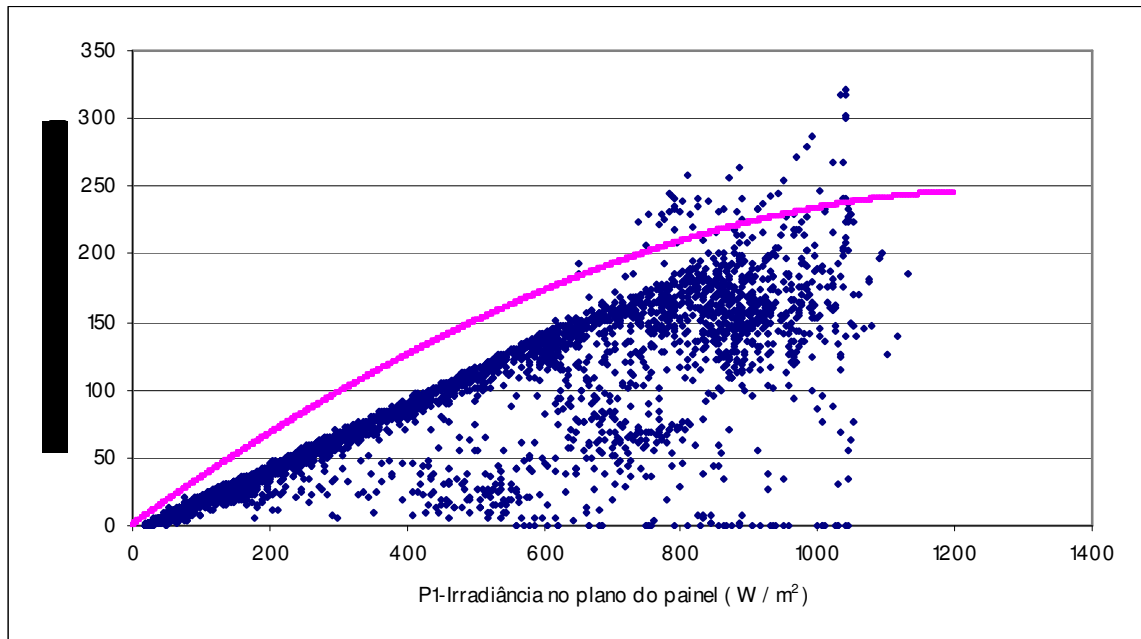


Figura 6 - Gráfico dos dados da potência e irradiância medidos durante o primeiro período de observação e da curva da potência máxima do gerador fotovoltaico.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou, através de um estudo de características intrínsecas de células fotovoltaicas e suas propriedades elétricas já desenvolvidas na literatura, uma maneira analítica diferencial da obtenção de uma relação da potência máxima (P_{MAX}) de uma célula fotovoltaica dada por:

$$P_{MAX} = \frac{V_{OC} I_{SC} - R_s I_{SC}^2 - V_t I_{SC} \ln\left(1 + \frac{V_{OC}}{V_t}\right)}{1 + \frac{V_t}{V_{OC}}}$$

Com as simulações das equações desenvolvidas nos módulos fotovoltaicos instalados para o experimento, foi possível determinar os valores característicos do sistema fotovoltaico em relação à célula fotovoltaica, ao módulo fotovoltaico e ao gerador fotovoltaico.

Assim, estabeleceu-se uma forma de determinação da curva de potência máxima do gerador fotovoltaico, o que é de fundamental importância para qualquer sistema de viabilidade de implantação de sistemas baseados em energias renováveis.

5 REFERÊNCIAS

CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia fotovoltaica**. 2. ed. Lisboa Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico Secção de Energia, 2007. 62 p. (Energias renováveis e produção descentralizada). Disponível em: <http://enerp4.ist.utl.pt/RuiCastro/download/Fotovoltaico_ed3.pdf>. Acesso em: 26/03/2010.

GABRIEL FILHO, L. R. A. ; SERAPHIM, O. J. ; CREMASCO, C. P. ; CANEPPELE, F. de L. . **Metodologia da determinação dos parâmetros característicos de sistemas eólicos de geração de energia**. *Revista Tecnologia*, Canoas, v. 9, p. 15-27, 2008.

LORENZO, E. **Eletricidade solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos**. Espanha: Artes Gráficas Galas, 1994. 338 p.

OLIVEIRA, S. H. F. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo**. 1997. 240 f. Dissertação (mestrado em Agronomia área de concentração Energia - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo/ Universidade de São Paulo), São Paulo, 1997.