

Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho

Estor Gnoatto^{1*}, Rivanildo Dallacort², Reinaldo Prandini Ricieri³, Suedemio de Lima Silva³ e Yuri Ferruzi³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil. ²Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. ³Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: estor@md.cefetpr.br

RESUMO. No presente trabalho foi desenvolvido um estudo sobre um sistema fotovoltaico autônomo, com armazenamento de energia, instalado na Estação Experimental Agrometeorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Estado do Paraná, Campus Cascavel, a uma latitude 24° 59' Sul, longitude de 53° 26' Oeste, com altitude de 682 metros, sob condições reais de campo, durante o ano de 2002. Foi determinada a curva característica do painel, utilizando uma aquisição de dados um "micrologger" da Campbell Scientific-INC modelo CR10X, programado para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média aritmética de cinco minutos dos dados das componentes de temperatura de operação do painel; tensão e corrente do sistema fotovoltaico. Baseando-se nesses dados pode-se determinar que a curva característica do painel em condições reais de campo apresenta uma perda de 24% em seu rendimento em relação ao padrão STC (condições padrão de teste).

Palavras-chave: energia solar, sistemas fotovoltaicos, recursos renováveis.

ABSTRACT. Determination of the characteristic curve of a photovoltaic panel in real conditions of work. The purpose of the present work was to develop the study of an autonomous photovoltaic system, with storage of energy, installed in the Agro-meteorological Experimental Station of Universidade Estadual do Oeste do Paraná, State of Paraná, Campus Cascavel, at 24° 59' latitude south, 53°26' longitude west, 682 meters of altitude, under real field conditions, during the year 2002. Efficacy of the photovoltaic panels has been evaluated under real field conditions, as well as to determine its characteristic linear fit. A 'micrologger' Campbell Scientific-INC model CR10X was used to acquire data, and it was programmed to accomplish a reading per second in each channel and to store the arithmetic average of data from five minutes of operational temperature of the panel, photovoltaic system tension and current. According to results, it could be determined that the panel characteristic linear fit in real field conditions shows 24% less field than standard STC (Standard Test Conditions).

Key words: solar energy, photovoltaic systems, renewable resources.

Introdução

No Brasil, o Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético (DNDE) do Ministério de Minas e Energia vem utilizando sistemas fotovoltaicos no Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), em comunidades rurais distantes da rede elétrica, nas quais o custo de extensão da rede é elevado, comparado com a carga requerida para o atendimento dessas comunidades. Nesse programa o sistema fotovoltaico é utilizado em aplicações sociais, tais como: iluminação pública, bombeamento de água, energização de escolas, postos de saúde, centros comunitários, postos telefônicos, produção de gelo e dessalinização da água.

Para estudos mais precisos do potencial de um determinado local, com vistas a um projeto específico, é recomendável a realização de medições locais, buscando avaliar as influências localizadas de relevo, poluição e outros. Na otimização de projetos de aproveitamento de energia solar é importante o conhecimento das variações anuais, sazonais e diárias da radiação solar. Uma avaliação da potencialidade desse recurso exige a realização de um levantamento abrangente dos níveis de radiação solar por meio de medições com instrumentos solarimétricos e a utilização de modelos matemáticos para extrapolação dos valores medidos para áreas desprovidas de dados.

A tecnologia fotovoltaica apresenta-se como uma das melhores opções para fornecer eletricidade às comunidades rurais isoladas, e é largamente utilizada

em outros países (Costa e Eck, 1998). Apesar de não possuir limitações quanto à quantidade de eletricidade produzida, o sistema de geração apresenta custos elevados e isso pode restringir as expectativas de consumo dos usuários (Serpa, 2001). Para Abade (1996), a geração de eletricidade por energia solar fotovoltaica é um recurso estratégico capaz de trazer contribuição à sustentabilidade de demandas energéticas em locais distantes da rede elétrica, evitando custos marginais superiores, além de poder prover o desenvolvimento sócio-econômico e preservar o meio ambiente em zonas isoladas.

De acordo com a Eletrobras em média, a região com maior potencial de utilização de energia solar é a nordeste, com um potencial médio anual de 426 ly.dia^{-1} ou 206 W.m^{-2} , seguida da região Centro-Oeste com 417 ly.dia^{-1} ou 202 W.m^{-2} . A região sul apresenta o menor potencial, com 369 ly.dia^{-1} ou 179 W.m^{-2} . O comportamento geral da radiação solar no Nordeste varia entre 200 e 700 ly.dia^{-1} (97 a 340 W.m^{-2}), com um período mínimo no trimestre maio-junho-julho, com 60% dos postos solarimétricos registrando intensidade de radiação na faixa de 300 a 400 ly.dia^{-1} (145 a 194 W.m^{-2}). Isso significa que a maior parte da região recebe menos radiação nesse período, mas no trimestre novembro-dezembro-janeiro observa-se que em 90% dos postos a intensidade de radiação está acima de 400 ly/dia (194 W.m^{-2}).

As características elétricas dos módulos são geralmente estimadas de acordo com sua potência máxima de saída, sob condições de teste padrão (STC - Standard Test Conditions), irradiação solar 1000 W.m^{-2} , temperatura da célula de 25°C e distribuição espectral AM=1,5. Como essa temperatura raramente é atingida em condições reais de operação, em dias de sol claro é tipicamente de 20 a 40°C maior que a ambiente. Para complementar as informações do desempenho elétrico em STC, alguns fabricantes informam também suas características à temperatura nominal de operação da célula (NOTC - Nominal Operation Cell Temperature), definida com condições nominais de operação em um nível de irradiação na superfície do módulo de 800 W.m^{-2} , temperatura ambiente de 20°C, distribuição espectral AM=1,5 e velocidade do vento de 1m/s (Overstraeten e Mertens, 1996).

A incidência de irradiação solar sobre o módulo proporciona tensão de circuito aberto (V_{oc}), aumentando como função logarítma da intensidade luminosa e podendo ser medida por meio de um voltímetro nos terminais positivo e negativo no módulo. A corrente de curto circuito (I_{sc}), variando linearmente com a intensidade luminosa, pode ser medida através de amperímetro. Quando conecta-se um acessório, pode-se gerar um gráfico I x V.

O ponto de potência máxima (P_m) corresponde ao

produto da tensão de potência máxima (V_{mp}) e corrente de potência máxima (I_{mp}). Os valores de P_m , V_{mp} e I_{mp} são obtidos ligando-se aos módulos uma resistência de carga R ($R = V_{mp} \times I_{mp}$), em que R é a P_m dissipada pela resistência. Os valores P_m , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc} são os cinco parâmetros que especificam os produtos sob dadas condições. O gráfico da Figura 5 mostra a curva característica I x V, superposta à curva de potência para análise dos parâmetros. O fator de forma (FF) ou fator de enchimento, conforme Palz (1995), é uma grandeza que expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I x V. Quanto melhor a qualidade das células do módulo, mais próxima da forma retangular será sua curva.

Para que a energia solar fotovoltaica seja melhor avaliada, ainda são necessários diversos tipos de estudos, em destaque a avaliação das características elétricas em condições reais de trabalho para um conjunto de módulos fotovoltaicos. Atendendo a essa necessidade a presente pesquisa estabeleceu como objetivo determinar a curva característica do painel fotovoltaico em condições reais de campo.

Material e métodos

Localização do experimento

A presente pesquisa foi realizada na Estação Experimental Agrometeorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Estado do Paraná, a uma latitude 24° 59' Sul, longitude de 53°26' Oeste e altitude de 682 metros, no período de 01 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2002. Foi montado um sistema fotovoltaico isolado (stand-alone), com sistema de armazenamento de energia, composto de: 2 painéis fotovoltaicos, marca Solarex, modelo MSX-56, tensão padrão 12 V, corrente padrão 3,35 A, potência 56 W; 2 baterias recarregáveis estacionárias de chumbo-cálcio, marca Concorde, modelo PVX-1285 (85Ah-12 V). Controlador de carga e descarga do sistema de armazenamento, marca Morningstar Prostar 30 (30 A).

Os painéis fotovoltaicos foram ligados em paralelo, com os módulos operando a uma tensão regulada mantida pelo controlador de carga e descarga que alimenta o banco de baterias (ligadas em paralelo) e a carga. A carga é representada por uma resistência fixa que é acionada através de um controlador de horário digital, para intervalos de tempo pré-definidos, de tal modo que toda a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos é armazenada no banco de baterias ou utilizada pela carga. Os painéis fotovoltaicos foram instalados com face voltada para o norte geográfico, a uma altura de 1 metro do solo (parte mais baixa do conjunto) com ângulo de

inclinação igual à latitude local. Foram instalados 10 módulos fotovoltaicos, entretanto no objeto em estudo foram analisados dois painéis fotovoltaicos, denominados de painel 1 e painel 2. O conjunto fotovoltaico avaliado, formado por dois painéis da marca Solarex, modelo MSX-56, cada um é composto de 36 células de silício policristalino ligadas em série, podendo fornecer até 112,2 W em condições STC.

A Tabela 1 mostra os dados das características elétricas dos painéis utilizados e os dados calculados da eficiência para condições STC e NOCT, apresentando as características elétricas fornecidas pelo fabricante para o modelo. Os dados foram obtidos em laboratório através de um simulador solar e representam seu desempenho para ligação da configuração em 12 V, não incluem perdas adicionais tais como: diodos de bloqueio e fiação. Pode também apresentar características diferentes sob incidência de irradiação solar. (Solarex).

Tabela 1. Características elétricas dos painéis fotovoltaicos.

Dados do painel	Painel 1 (stc)	Painel 2 (stc)	Painel1 (notc)	Painel2 (notc)
Corrente de curto circuito Isc (A)	3,73	3,62	-	-
Tensão de circuito aberto Voc (V)	20,9	21,1	-	-
Tensão máxima de pico Vmp (V)	16,7	16,9	-	-
Corrente máxima de pico Imp (A)	3,39	3,28	2,7	2,8
Potência máxima de pico (W)	56,8	55,4	40,9	39,9
Eficiência painel (%)	*12,58	*12,27	*11,32	*11,05
Temperatura painel °C	25	25	49	49

NOTAS: 1- Dados fornecidos pelo fabricante (extraídos do painel fotovoltaico). 2 - Sinais convencionais utilizados; *Dados calculados de acordo com dados de placa do painel. - Dados não fornecidos pelo fabricante.

O sistema de aquisição de dados é constituído por um "micrologger" da Campbell Scientific-INC modelo CR10X, programado para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média aritmética de cinco minutos dos dados das componentes de radiação solar direta, difusa, global no plano horizontal e global na incidência do painel; temperatura bulbo úmido, bulbo seco, e temperatura de operação do painel; tensão e corrente do sistema fotovoltaico.

Os dados de temperatura foram obtidos por termopar tipo K, instalados na parte inferior do painel fotovoltaico (medida de temperatura do painel).

Os dados foram registrados no micrologger e armazenados num microcomputador, na forma de arquivo.

A curva característica de painéis fotovoltaicos pode ser obtida sob condições naturais de luz solar ou através de simulador. O procedimento padrão internacional é baseado na norma IEC 904-1. Para uma célula ou conjunto de células. As condições de irradiação devem ser estáveis com uma variação menor que 1%.

Os dados para a plotagem da curva característica do painel (tensão e corrente) são obtidos através de uma

carga variável, (variando de curto circuito a circuito aberto) sendo que a corrente é medida através de um resistor de precisão (*shunt*) ligado em série com a carga; a diferença de potencial da carga é obtida por medida direta em paralelo com a mesma e a temperatura é obtida por um termopar acoplado diretamente ao painel, sendo que todos esses dados são lidos e armazenados num sistema de aquisição de dados automático (Lasnier e Ang, 1990; Treble, 1991).

Utilizaram-se dois processos para a determinação da curva (V x I) em ambiente externo. Primeiramente foram obtidos os dados de operação, em condição ambiente plena de operação, num outro processo estudou-se o efeito da aplicação de uma lâmina d'água aplicada continuamente sobre o painel, com a finalidade de diminuir e estabilizar a temperatura do painel.

A aplicação do filme d'água teve como finalidade manter as mesmas condições ambientais, variando a temperatura do painel, permitindo, dessa forma, que se estabeleça a curva (V x I), sob o efeito de outra temperatura, conforme a metodologia aplicada por Krauter e Schimid (2002) para estabilizar a temperatura do painel.

A determinação da curva foi efetuada em um painel fotovoltaico 1 (Solarex MSX-56 de silício policristalino com 36 células ligadas em série) do conjunto, com um termopar (tipo K) conectado em sua parte inferior e um piranômetro para medir a radiação solar global na mesma inclinação do painel. Na aquisição utilizou-se um datalogger da Campbell Scientific, programado para realizar leituras com frequência de 1Hz e armazenar a média aritmética a cada dez segundos. Os dados para a plotagem da curva característica foram coletados em dia de céu limpo com irradiação de 1000 W.m⁻² e, como carga, foi utilizado um resistor variável do tipo toroidal, marca Eletele (25 Ω, 100 W).

Resultados e discussão

Determinação da curva característica do painel

A curva característica do painel fotovoltaico foi determinada sobre um dos painéis (painel 1). A Figura 1 mostra a curva característica V x I (tensão x corrente), juntamente com a curva de V x P (tensão x potência), sob condições de campo, de onde foi obtida a tensão máxima de pico (V_{mp}) de 13,34V e a corrente máxima de pico (I_{mp}) de 3,23A, com ponto de potência máxima (P_m) de 43,14 W e rendimento de 9,57%.

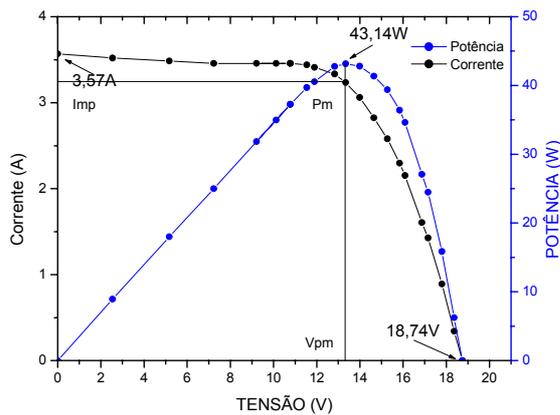


Figura 1. Curva característica do painel fotovoltaico em condições de campo com temperatura do painel a 51°C.

A Figura 2 mostra a curva característica $V \times I$ (tensão x corrente), juntamente com a curva de $V \times P$ (tensão x potência), sob condições de campo, aplicando-se sobre o painel um filme de água contínuo, produzindo, dessa forma, o efeito de manter a temperatura praticamente constante, em torno de 35°C com variação de aproximadamente 1,0%, de onde foi obtida a tensão máxima de pico (V_{mp}) de 14,54V e a corrente máxima de pico (I_{mp}) de 3,22A, com ponto de potência máxima (P_m) de 46,75 W e com rendimento de 10,36%.

Na Figura 3, observamos que a temperatura em condições de campo foi de 51°C, ou seja, 1,04% acima das características STC. Esse aumento proporcionou um decréscimo na tensão máxima de pico, que passou de 16,70V para 13,34V, com a corrente máxima de pico praticamente constante, semelhante aos resultados obtidos por Palz (1995) e Overstraeten e Mertens (1996). A eficiência do painel com a temperatura de 25°C é de 12,58% e para 51°C é de 9,57%. A diminuição na eficiência deve-se ao fato de que essa variável é diretamente proporcional à potência máxima de pico, a qual é calculada com o produto da tensão (V_{mp}) pela corrente (I_{mp}). Sandnes e Reskstad (2002) encontraram uma eficiência de 9,9% com temperatura de 52°C, para um painel de silício monocristalino. A potência máxima de pico do painel é de 56,8 W (dados de placa) em condições STC e 43,14 W em condições de campo, uma perda de 24% em relação às condições STC. Segundo Parretta et al. (1998), a potência do painel em condições de campo pode diminuir em mais de 20%. A Tabela 2 mostra as características elétricas do módulo fotovoltaico Solarex MSX-56 em condições STC e em condições de Campo.

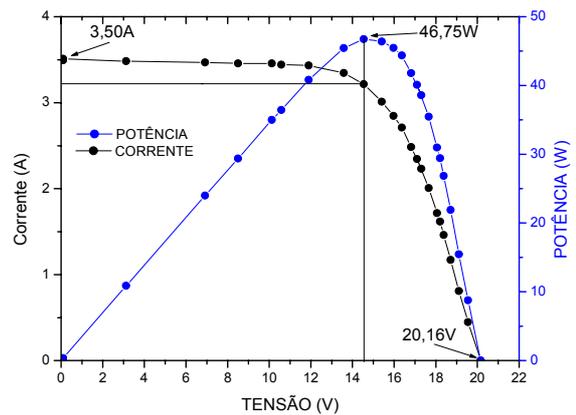


Figura 2. Curva característica do painel fotovoltaico em condições de campo (painel com filme de água).

A estratégia da aplicação do filme de água sobre o painel baixando a temperatura do mesmo, permite um aumento da tensão, e conseqüentemente uma pequena queda na corrente, aumentando proporcionalmente a potência gerada, tendo para a potência máxima uma tensão ($V = 14,54V$) e corrente ($I = 3,22A$).

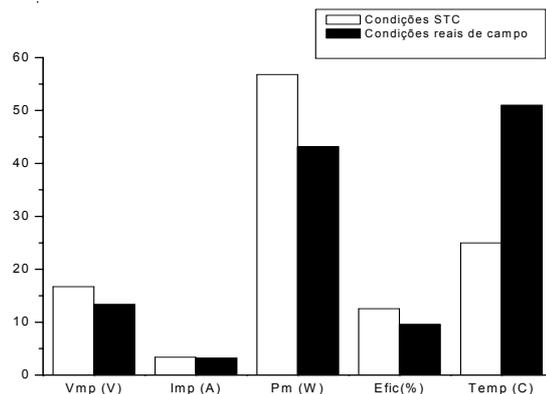


Figura 3. Características elétricas do módulo fotovoltaico em condições de campo e stc.

O Gráfico da Figura 4 mostra as curvas de corrente X tensão, para três condições distintas, conforme Tabela 2. Comparativamente tem-se que:
 a) Usando como referência a curva padrão STC:

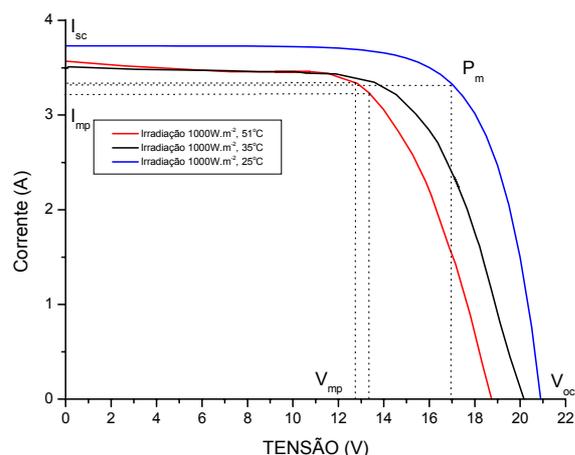


Figura 4. Curvas características do módulo fotovoltaico em condições stc, e condições de campo (painel com lâmina de água e normais).

Tabela 2. Características elétricas do módulo fotovoltaico solarex msx-56 em condições stc, condições de campo com filme de água e condições de campo.

Dados do painel	Painel 1 (stc)	Condições de campo com filme d'água	Condições normais de campo
Corrente de curto circuito Isc (A)	3,73	3,50	3,57
Tensão de circuito aberto Voc (V)	20,9	20,16	18,74
Tensão máxima de pico Vmp (V)	16,7	14,54	13,34
Corrente máxima de pico Imp (A)	3,39	3,22	3,23
Potência máxima de pico (W)	56,8	46,75	43,14
Eficiência painel (%)	*12,58	10,36	9,57
Temperatura painel °C	25	35	51

Notas: 1.- Dados STC são fornecidos pelo fabricante (extraídos do painel fotovoltaico). 2.- Sinais convencionais utilizados: * Dados calculados de acordo com dados de placa do painel.

- as curvas a campo e filme de água sofrem uma queda da tensão, devido ao aumento da temperatura, conforme as características elétricas das células fotovoltaicas, assim sendo, para a lâmina d'água, a tensão de circuito aberto sofre uma variação com decréscimo de 3,54% e para as condições normais de campo um decréscimo 10,33%.

- a lâmina de água registra uma temperatura média no painel de 35°C, sendo a variação de temperatura 40% maior que a condição padrão de laboratório 25°C.

- as condições normais de campo registram uma temperatura média no painel de 51°C, com uma variação 104% maior que a padrão.

- a corrente de curto circuito sofre variação de 6,17% para a condição com lâmina d'água, e para as condições normais de campo uma variação de 4,30%.

- a potência máxima de pico apresenta um decréscimo de 17,69% para condição com lâmina de água e um decréscimo de 24,05% para condições normais de campo.

- a eficiência apresenta uma variação com decréscimo de 17,65%, para a lâmina de água e uma variação com decréscimo de 23,93%, para as

condições normais de campo.

b) Comparando as curvas a campo, tendo como referência a curva de 51°C:

- a corrente de curto circuito sofre uma variação com decréscimo de 1,96%.

- a tensão de circuito aberto apresenta uma variação de 7,58%.

- a potência tem uma variação de 8,37%.

- a eficiência tem uma variação de 8,25%.

- o padrão de comportamento das curvas obtidas a campo, mostra-se dentro das características de trabalho fornecidas pelo fabricante Solarex (2001), ou seja, conforme a temperatura diminui a tensão aumenta e a corrente apresenta um decréscimo.

Conclusão

Mediante os resultados obtidos na realização deste trabalho, pode-se concluir que:

- o comportamento das curvas características do painel fotovoltaico em condições de campo apresentam-se dentro das variações previstas pelo fabricante;

- a potência máxima de pico do painel em condições de campo é 24% menor que a fornecida pelo fabricante (obtida em padrões STC).

Referências

ABADE, A.K. Energia solar fotovoltaica no Brasil: projetos pilotos ou um grande mercado? In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 7., 1996. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UFRJ, v. 1, 1996. p. 347-358.

COSTA, S.H.; ECK, M. Modelo sustentável de difusão da tecnologia fotovoltaica para uso residencial. In: CONFERENCIA LATINO-AMERICANA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL, 17., 1998. Recife. *Anais...* Recife: UFP, 1998. CD-ROM.

KRAUTER, S.; SCHIMID, U. Optical and thermal improvements of PV performance by a flowing film of water at the of PV generators. Disponível em: <<http://www.solar.coppe.ufrj.br/pub99/front.htm>>. Acesso em: 11 dez. 2002.

LASNIER, F.; ANG, G.T. *Photovoltaic engineering handbook*. Bangkok, Thailand: IOP Publishing Ltd, 1990.

OVERSTRAETEN, R.W.; MERTENS, R.P. *Physics, technology and use of photovoltaics*. London: Modern Energy Studies, 1996.

PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. São Paulo: Hemus, 1995.

PARRETA, A. *et al.* Effects of solar irradiations on the outdoor performance of modules. *Optics Commun.*, Amsterdam, v. 153, p. 153-163, 1998.

SANDNES, B.; RESKSTAD, J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Sol. Energy*, Kidlington, v. 72. p. 63-73, 2002.

SERPA, P.M.N. *Eletrificação fotovoltaica em comunidades caiçaras e seus impactos socioculturais*. 2001. Tese

(Doutorado)-Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

TREBLE, F.C. *Generating electricity from the sun*. New York: Pergamon Press, 1991.

Received on September 12, 2005.

Accepted on December 20, 2005.