

ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE ENERGIA ELÉTRICA NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS (SP)

Rafael Deléo e Oliveira¹

José Carlos de Melo Vieira Júnior²

RESUMO

Já é possível encontrar paisagens de campos e orlas de muitos países em que se destacam aerogeradores e telhados fotovoltaicos, que fazem parte da arquitetura de muitos centros urbanos de países ricos, gerando energia elétrica limpa. No Brasil, a principal barreira é a econômica, pois a energia gerada através da utilização de painéis fotovoltaicos apresenta um custo superior à gerada pelas fontes convencionais, principalmente a gerada pelas usinas hidrelétricas, principal fonte da matriz energética nacional. Nesse sentido, este trabalho analisou o custo da energia que seria gerada por um gerador fotovoltaico composto por 54 módulos de 40 Wp cada, totalizando 2,16 kWp de potência. Esse sistema seria capaz de gerar anualmente 3,77 MWh, representando uma economia de R\$ 1.239,40, sendo necessário subsídio fiscal de aproximadamente R\$ 1,4642/kWh para que o mesmo não dê prejuízo ao final da vida útil do projeto.

Palavras-chave: Módulo Fotovoltaico, Efeito Fotovoltaico, Geração Fotovoltaica, Energia Solar, Radiação Solar.

1 Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), Avenida Trabalhador Saocarlense, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP. e-mail: rafael.deleo.oliveira@usp.br

2 Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), Avenida Trabalhador Saocarlense, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP. e-mail: jcarlos@sc.usp.br



ABSTRACT

It is possible to find fields and coast of many countries in which wind turbines and photovoltaic roofs are part of the landscape and of the architecture of many cities in rich countries, generating clean electricity. In Brazil, the main barrier is economic, because the energy generated through the use of photovoltaic panels has higher cost than that offered by conventional energy sources, mainly hydroelectric plants, the main source of national energy matrix. In this sense, this work analyzed the cost of energy that would be generated by a photovoltaic generator consisting of 54 modules of 40 Wp each, totaling 2.16 kWp of power. This system would be capable of generating 3.77 MWh annually, representing savings of about R\$ 1,239.40, and requiring tax subsidy of about R\$ 1.4642/kWh so that it does not cause financial losses until end of the lifetime of the project.

Keywords: Photovoltaic Modules, Photovoltaic Effect, Photovoltaic Generation, Solar Energy, Solar Radiation.

1. INTRODUÇÃO

A busca por energia limpa, com a geração no próprio ponto de consumo, pode ser alcançada com a utilização de células fotovoltaicas que captam a radiação solar e a transformam em energia elétrica. Esse processo é limpo, livre de ruídos, sem produção de fumaça ou resíduo e sem partes móveis. Isso foi possível graças a Edmond Becquerel que em 1839 observou o efeito fotovoltaico pela primeira vez. Nessa ocasião, foi observado que certos materiais produziam pequena quantidade de corrente elétrica quando expostos à luz. Mas, o primeiro dispositivo fotovoltaico só foi desenvolvido em 1876, sendo que somente em 1956 foi iniciada a produção industrial devido à corrida espacial, para fornecimento de energia durante os períodos de permanência no espaço e também para a manutenção de satélites (CRESESB, 1999; Cunha, 2006; Osis, 2007).

Entretanto, mesmo sendo uma tecnologia conhecida há algum tempo, a utilização de painéis fotovoltaicos na geração de energia elétrica residencial, comercial e industrial encontra algumas limitações. Essas limitações estão ligadas ao fato de que o período de insolação é curto durante o dia e que existem dias chuvosos ou com períodos de maior nebulosidade, durante os quais a incidência dos raios solares na superfície terrestre acaba

sendo afetada. Então, assim como a geração eólica, a geração fotovoltaica deve ser desenvolvida e utilizada de forma a complementar as fontes convencionais de geração (hidroelétrica e termoeétrica). No caso da geração hidroelétrica, a utilização de painéis solares ajudaria a regular os níveis dos reservatórios das usinas, principalmente durante o inverno nas regiões sul e sudeste, período caracterizado por baixos índices pluviométricos e no caso das usinas termoeétricas, ajudariam no sentido de utilizar menor quantidade de combustíveis fósseis, minimizando o impacto ambiental causado pela queima de derivados de petróleo e carvão mineral.

Sendo utilizada de forma complementar às fontes convencionais de geração, não existe a necessidade de armazenamento da energia em bancos de bateria para utilização em períodos com baixa radiação solar. O fato de não utilizar baterias garante à geração fotovoltaica a classificação de fonte alternativa limpa, uma vez que a utilização de baterias representaria uma potencial fonte de poluição do meio ambiente por apresentarem em sua composição metais pesados como chumbo, níquel e cádmio.

Mesmo sendo produzida por uma fonte renovável e gratuita, a energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos apresenta custo superior ao apresentado pela energia gerada por meio de fontes convencionais de geração. Esse custo está relacionado ao elevado custo das células fotovoltaicas e de outros componentes que se fazem necessários em uma instalação desse tipo, tais como o inversor de corrente (inversor de tensão), o controlador de carga e o banco de baterias (no caso de sistemas isolados), como ilustrado na Figura 1 a seguir.

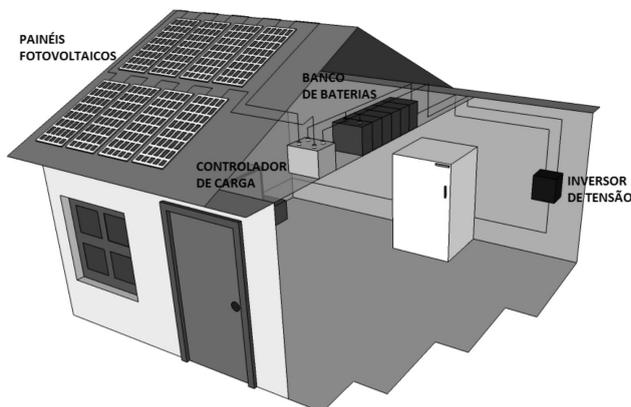


Figura 1 – Sistema fotovoltaico isolado.



Então, buscando a redução de custo na produção de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas, são imprescindíveis os dimensionamentos exatos do sistema, objetivando a redução dos custos de aquisição e instalação dos equipamentos, além de ser necessária a utilização eficiente e racional da energia gerada.

Dessa forma, este trabalho tem a intenção de dimensionar um sistema fotovoltaico que opere de forma complementar à geração convencional de energia elétrica na cidade de São Carlos, levantando os equipamentos necessários, os custos de aquisições, estimando a quantidade de energia gerada e com isso realizar uma análise econômica do custo de geração de energia elétrica pelo gerador fotovoltaico dimensionado.

2. COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Como a proposta é o dimensionamento de um sistema fotovoltaico que opere de forma complementar à geração convencional de energia elétrica, não há a necessidade de utilização de banco de baterias e controladores de carga. Então, é feito um breve comentário sobre o módulo fotovoltaico e o inversor de corrente, componentes que se fazem necessários no gerador fotovoltaico a ser dimensionado:

Módulo Fotovoltaico: Este equipamento converte a energia solar incidente na superfície terrestre em energia elétrica através do fenômeno físico denominado “efeito fotovoltaico” (Cunha, 2006). O módulo é composto pelo conjunto de células “wafer” de silício em arranjos (série e/ou paralelo) que produzem tensão e corrente suficientes para a utilização da energia gerada. Cada célula fotovoltaica é capaz de fornecer uma tensão em torno de 0,4 Volts no ponto de máxima potência e uma corrente entre 1,5 e 4,5 Ampères (A). A maioria dos módulos fotovoltaicos encontrados no mercado é composta por 36 células fotovoltaicas de silício. Depois de conectadas umas as outras, as células são encapsuladas com a finalidade de isolá-las e protegê-las das intempéries, além de garantir certa rigidez ao módulo. O módulo é composto das seguintes camadas: vidro temperado de alta transparência, acetato de etil vinila (EVA), células, outra camada de acetato de etil vinila e filme de fluoreto de polivinila (Tedlar) ou vidro (CRESESB, 1999; Cunha, 2006; Osis, 2007).

Inversor: Responsável pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), são também conhecidos como “conversor CC-CA”

ou PCU - *Power Conditioning Unit* (Unidade Condicionadora de Potência). Destaca-se que é um equipamento que deve dissipar o mínimo de potência, além de produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica, quando o sistema fotovoltaico estiver interligado à rede de distribuição de energia elétrica (CRESESB, 1999; Cunha, 2006; Osis, 2007).

3. MATERIAL E MÉTODO

No dimensionamento de um gerador fotovoltaico o primeiro passo é determinar qual a potência nominal necessária ou desejada.

O segundo passo é realizar o cálculo do número de módulos fotovoltaicos (N) necessários para atender a potência nominal do gerador previamente calculada ou estipulada. O cálculo é realizado levando-se em conta a potência nominal total da instalação fotovoltaica (P_T), em W_p (watt pico), e a potência nominal de cada painel (P_p), também em W_p , pela seguinte equação (Lisita Junior, 2005):

$$N = \frac{P_T}{P_p} \quad (1)$$

Como a energia é gerada em corrente contínua, existe a necessidade de convertê-la para corrente alternada a fim de que a mesma possa ser utilizada no acionamento de equipamentos residenciais, comerciais ou até mesmo industriais, dependendo da potência do sistema dimensionado, e para isso utiliza-se o inversor de corrente. Então, o terceiro passo é a escolha do inversor de corrente que atenda às exigências de projeto.

Realizado o dimensionamento do gerador fotovoltaico, o próximo passo é realizar o cálculo ou estimativa da quantidade de energia passível de ser gerada pelo sistema.

A energia passível de ser gerada (E_g) pelo sistema fotovoltaico dimensionado, em kWh_p (quilowatt-hora pico), depende da potência nominal total do gerador fotovoltaico (P_T), expressa em kW_p (quilowatt pico), do rendimento do inversor de corrente contínua para corrente alternada ($\eta_{CC/CA}$), expresso em porcentagem, e do número de horas de Sol Pleno (SP), expresso em horas. A energia gerada pode ser calculada pela seguinte equação:



$$E_g = P_T \times SP \times \eta_{CC/CA} \quad (2)$$

O número de horas de Sol Pleno (SP) é equivalente à energia total diária incidente sobre a superfície inclinada em kWh/m² (quilowatt-hora por metro quadrado). Essa grandeza representa o período que a radiação solar permanece constante e igual a 1000 W/m², resultando no equivalente da energia acumulada durante o período de insolação no local em questão (CRESESB, 1999).

O número de horas de Sol Pleno pode ser calculado através da seguinte equação (CRESESB, 1999):

$$SP = \frac{\bar{H}_T \text{ (kWh / m}^2\text{)}}{1000 \text{ (W/m}^2\text{)}} \quad (3)$$

Sendo \bar{H}_T a radiação solar global incidente no plano inclinado, em média diária ou mensal (kWh/m²/dia ou kWh/m²/mês).

Para o cálculo da radiação solar global incidente no plano inclinado (\bar{H}_T), Duffie e Beckman (1991) propõem a seguinte equação:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \cdot \left(1 - \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}}\right) \cdot R_B + \bar{H}_D \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \bar{H} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (4)$$

O valor para a refletância da vizinhança (ρ_g), variável adimensional, nas proximidades do plano inclinado é indicada na Tabela 1.

Tabela 1 – Refletância de materiais

Material	ρ_g
Terra	0,04
Tijolo vermelho	0,27
Concreto	0,22
Gramma	0,20
Barro/argila	0,14
Superfície construção clara	0,60

Fonte: ABRAVA, 2008.

O valor de R_B corresponde à razão entre a radiação extraterrestre incidente no plano inclinado e a radiação incidente no plano horizontal (equação 5), sendo que ω'_s corresponde ao pôr-do-sol aparente para a superfície inclinada (equação 6):

$$R_g = \frac{(\pi/180^{\text{os}}) \cdot (\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{cos}\beta - \text{sen}\delta \cdot \text{cos}\phi \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{cos}\gamma)}{\text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega_s + (\pi/180^{\text{os}}) (\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi)} + \frac{\text{sen}\omega'_s \cdot \text{cos}\delta \cdot (\text{cos}\phi \cdot \text{cos}\beta + \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{cos}\gamma)}{\text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega_s + (\pi/180^{\text{os}}) (\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi)} \quad (5)$$

$$\omega'_s = \text{mínimo} \left[\begin{array}{l} \text{cos}^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \\ \text{cos}^{-1}[-\tan(\phi + \beta)]\tan\delta \end{array} \right] \quad (6)$$

Os ângulos ϕ , δ , β , γ são definidos da seguinte forma:

Latitude Geográfica (ϕ): coordenada geográfica definida na esfera ou superfície terrestre.

Declinação Solar (δ): pode ser calculada pela equação de Cooper (Vianello e Alves, 1991):

$$\delta = 23,45^\circ \text{sen} \left(2\pi \frac{284 + d}{365} \right) \quad (7)$$

Em que d representa o dia Juliano e varia de 1 (1º de janeiro) a 365 (31 de dezembro) (Pereira, 2005).

Inclinação do plano inclinado (β): ângulo formado entre o plano horizontal e o plano inclinado formado pelos módulos fotovoltaicos, expresso em graus (ABRAVA, 2008).

Ângulo azimutal de superfície (γ): ângulo formado entre a projeção da reta normal ao plano inclinado e a direção Norte-Sul. Seu valor varia de -180° a 180° e indica o desvio do Norte Geográfico (ABRAVA, 2008).

O cálculo da radiação solar global incidente no plano horizontal em média diária (\bar{H}), expressa em kWh/m²/dia, é realizado com a equação proposta por Bennett (1965) e depende do valor da radiação solar extraterrestre (\bar{H}_0):

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{N} + ch \quad (8)$$

Em que h é a altitude da estação de medição ou a altitude de localização do plano inclinado, medida em quilômetros (km); \bar{N} é a duração



média do período diurno (h/dia); \bar{n} é a insolação média diária (h/dia); a, b e c são coeficientes empíricos tabelados e mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes empíricos de correlação de Bennett

Mês	a	b	c
Janeiro	0,225	0,4812	0,0007
Fevereiro	0,221	0,5026	0,0006
Março	0,221	0,5142	0,0005
Abril	0,188	0,5574	0,0005
Maio	0,197	0,5423	0,0004
Junho	0,235	0,4780	0,0004
Julho	0,264	0,4386	0,0004
Agosto	0,291	0,3768	0,0006
Setembro	0,260	0,4242	0,0006
Outubro	0,235	0,4744	0,0005
Novembro	0,207	0,4816	0,0007
Dezembro	0,237	0,4343	0,0007

Fonte: Bennett, 1965 (adaptado).

A radiação solar extraterrestre (\bar{H}_0), expressa em kWh/m²/dia, pode ser calculada pela equação proposta por Duffie e Beckman (1991):

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \times 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d}{365} \right) \right] \times (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta) \quad (9)$$

A Constante Solar (G_{sc}), fluxo de energia radiante, expressa em W/m², representa o fluxo de energia radiante que incide normalmente ao plano de uma superfície colocada fora da atmosfera terrestre. Segundo Duffie e Beckman (1991) o atual valor dessa constante é 1367 W/m².

O cálculo da radiação solar difusa incidente no plano inclinado em média diária (\bar{H}_D), expressa em kWh/m²/dia, é realizado com a equação proposta por Collares-Pereira e Rabl (1979):

$$\frac{H_D}{H} = 0,775 + 6,06 \cdot 10^{-3} \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos(115 \bar{K}_r - 103) \quad (10)$$

Na análise econômica do projeto é de grande importância o cálculo do tempo de retorno do investimento que pode ser realizado com ferramentas da matemática financeira.

O cálculo do período de retorno descontado (PRD) mede o prazo necessário, em anos, para se recuperar o capital investido. Este cálculo leva em conta o investimento inicial (Inv.inicial, em R\$), a economia anual proporcionada pelo projeto (Econo./ano, em R\$/ano), o tempo de vida útil do empreendimento em anos (n), a taxa de desconto (d), o fator de recuperação do capital (FRC) e o período de retorno simples em anos (PRS) (Santos e Sauer, 1998):

$$PRS = \frac{\text{Inv.inicial (R\$)}}{\text{Econo./ ano (R\$/ ano)}} \quad (11)$$

$$FRC_{(d,n)} = \frac{d \times (1 + d)^n}{(1 + d)^n - 1} \quad (12)$$

$$PRD = n \times FRC_{(d,n)} \times PRS \quad (13)$$

O cálculo do custo da energia gerada (CEG) ou custo da energia economizada (CEE) pelo gerador fotovoltaico em R\$/kWh pode ser realizado utilizando as equações apresentadas a seguir (Lisita Junior, 2005):

$$X = \frac{1 + i}{1 + d} \quad (14)$$

$$P_a = \frac{1 + X^n}{1 + X} \quad (15)$$

$$VP2 = P_a \times CI \quad (16)$$

$$Vp1 = \left(\frac{1 + i}{1 + d} \right)^n \times CI' \quad (17)$$

$$CCV = \text{Inv. Inicial} + VP1 + VP2 \quad (18)$$

$$CCVA = \frac{CCV}{X \times P_A} \quad (19)$$

$$CEE = CEG = \frac{CCVA \text{ (R\$)}}{E_g / \text{ano (kWh / ano)}} \quad (20)$$



Sendo:

X: fator de descapitalização (adimensional);

P_a : fator de amortização (adimensional);

VP1: valor presente (em R\$) para um item que seria adquirido n anos mais tarde (troca de inversores a cada 10 anos totalizando duas trocas, portanto $n = 10$ e $n = 20$);

VP2: valor presente acumulativo para os gastos anuais fixos em manutenção (em R\$);

Inv.inicial: investimento inicial de instalação do gerador fotovoltaico (em R\$);

CCV: custo do ciclo de vida (em R\$);

CCVA: custo do ciclo de vida anualizado (em R\$);

Cl: valor gasto anualmente em manutenção (em R\$);

Cl': valor de aquisição dos inversores (em R\$);

i: taxa de inflação (%_{aa});

d: taxa de desconto (%_{aa});

n: vida útil do empreendimento (em anos);

E_g /ano: energia gerada anualmente (kWh/ano).

Segundo Lisita Júnior (2005), para que projetos fotovoltaicos sejam atrativos economicamente são necessários incentivos e subsídios governamentais, sendo proposto o seguinte equacionamento para o cálculo de subsídios necessários:

$$\text{Subsídio (R\$)} = \text{Retorno(R\$)} - \text{EconomiaGerada (R\$)} \quad (21)$$

$$\text{Retorno(R\$)} = \text{FRC}(d,n) \times \text{Inv.Inicial(R\$)} \quad (22)$$

$$\text{EconomiaGerada(R\$)} = E_g(\text{kWh}) \times \text{TarifaLocal(R\$/kWh)} \quad (23)$$

$$\text{SUBSÍDIO (R\$/Kwh)} = \frac{\text{Subsídio (R\$)}}{E_g(\text{kWh})} \quad (24)$$

4. RESULTADOS

No dimensionamento foi utilizado painel fotovoltaico com potência de 40 W_p, modelo STP040-12/Rb da fabricante Suntech, resultando na necessidade de utilização de 54 módulos fotovoltaicos para o atendimento da potência nominal fixada em 2,16 kW_p (quilowatt-pico).

O gerador fotovoltaico foi dividido em dois arranjos, cada um com 27 módulos divididos em três conjuntos ligados em paralelo, sendo que cada conjunto é composto por nove módulos ligados em série. Com isso, cada arranjo tem uma potência nominal de 1,08 kW_p, fornecendo em seu ponto de potência máxima 156,6 V e 6,9 A em corrente contínua. Esses valores são obtidos para as condições padrão, ou seja, radiação solar incidente de 1000 W/m² e temperatura das células de 25 °C. Também, no sistema dimensionado, foi utilizado um inversor para cada arranjo, sendo que o inversor utilizado foi o modelo SB1100 Sunny Boy da fabricante SMA.

Com base em pesquisa de mercado, realizada em fevereiro de 2012, o painel solar STP040-12/Rb da fabricante Suntech pode ser encontrado ao valor de R\$ 836,00 no mercado nacional, totalizando gasto de R\$ 45.144,00 na aquisição dos 54 painéis solares. Já, o inversor SB1100 Sunny Boy da fabricante SMA é encontrado no mercado internacional ao valor de US\$ 2.360,00, totalizando gasto de US\$ 4.720,00 na aquisição dos dois inversores. Levando-se em conta a cotação do dólar para o dia 23 de fevereiro de 2012 o valor gasto na aquisição dos inversores seria de R\$ 8.024,00 (BCB, 2012).

Também, levando-se em conta gastos adicionais com frete e impostos de importação, com suporte para os módulos fotovoltaicos, com materiais necessários para o aterramento de toda a estrutura, cabos e componentes de proteção (disjuntor e chave fusível), medidor de energia, além de mão de obra, totalizando R\$ 10.633,60, pode-se estimar o investimento inicial (Inv.inicial) na montagem do gerador fotovoltaico em aproximadamente R\$ 63.801,60.

Para a estimativa da quantidade de energia gerada (E_g) mensalmente pelo gerador fotovoltaico é necessário realizar o cálculo da radiação solar global incidente no plano inclinado (\bar{H}_r) e para esse cálculo são necessárias algumas considerações.



Considerou-se a inclinação dos painéis fotovoltaicos igual à latitude local (β igual a $22^{\circ} 00' 00''$), a altitude (h) sendo a altitude média da região (h igual a 0,830 km) (CEPAGRI, 2012), a refletância da vizinhança (ρ_g) igual a 0,20 (Tabela 1) e o desvio do Norte Geográfico igual a zero grau (γ igual a 0°). Para favorecer a geração de energia elétrica os painéis solares devem estar voltados para o Norte Geográfico, ou seja, desvio do Norte Geográfico igual a zero grau (γ igual a 0°), e com inclinação igual à latitude local (β) (CRESESB, 1999; Lisita Junior, 2005). Os valores, da radiação solar global, calculados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores para as radiações solar em média diária e mensal

Mês	R_B	\bar{H}_0 (kWh/m ² /dia)	\bar{H} (kWh/m ² /dia)	\bar{H}_D (kWh/m ² /dia)	\bar{H}_T (kWh/m ² /mês)
Jan	0,9297	11,70	5,41	2,43	159,74
Fev	1,0139	11,19	5,18	2,32	144,86
Mar	1,1226	10,24	5,26	2,16	173,80
Abr	1,2305	8,83	4,53	1,86	153,60
Maio	1,2989	7,50	4,37	1,60	160,73
Jun	1,3224	6,83	3,96	1,45	142,56
Jul	1,3127	7,13	4,20	1,52	155,61
Ago	1,2624	8,28	4,60	1,76	164,93
Set	1,1669	9,73	4,90	2,05	160,12
Out	1,0494	10,92	5,42	2,29	171,74
Nov	0,9497	11,59	5,26	2,40	152,34
Dez	0,9046	11,80	4,84	2,38	141,36

Fonte: Autoria própria.

A estimativa da energia gerada (E_g) foi realizada para as condições padrões, ou seja, temperatura das células de 25°C . Não se levou em consideração o decréscimo na eficiência das células devido à temperatura de operação já que, segundo Lorenzo (2004) o rendimento de uma célula fotovoltaica sofre um decréscimo de 0,04 a 0,06% para cada grau centígrado ($^{\circ}\text{C}$) de aumento sofrido na temperatura durante a operação. Os valores mensais estimados para a energia gerada são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Energia produzida mensalmente e anualmente pelo gerador fotovoltaico

Mês	Dias	Horas de Sol Pleno (SP) diária	Potência do gerador (kWp)	Rendimento do inversor ($\eta_{CC/CA}$)	Energia gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	5,15	2,16	0,93	320,70
Fevereiro	28	5,17	2,16	0,93	290,79
Março	31	5,60	2,16	0,93	348,72
Abril	30	5,12	2,16	0,93	308,55
Maio	31	5,18	2,16	0,93	322,57
Junho	30	4,75	2,16	0,93	286,25
Julho	31	5,01	2,16	0,93	311,98
Agosto	31	5,32	2,16	0,93	331,29
Setembro	30	5,33	2,16	0,93	321,20
Outubro	31	5,54	2,16	0,93	344,99
Novembro	30	5,07	2,16	0,93	305,53
Dezembro	31	4,56	2,16	0,93	283,96
Total					3.776,53

Fonte: Autoria própria.

De acordo com as estimativas realizadas, anualmente o gerador fotovoltaico é capaz de gerar aproximadamente 3.776,53 kWh ou 3,77 MWh (megawatt-hora). A concessionária de energia local cobra dos consumidores residenciais R\$ 328,83/MWh consumido ou R\$ 0,32883/kWh consumido (tarifa residencial normal), taxa sem os impostos (PIS, COFINS e ICMS) que incidem sobre a tarifa unitária e que podem variar mensalmente (CPFL Paulista, 2012). Então, a economia gerada anualmente pelo sistema fotovoltaico seria de aproximadamente R\$ 1.239,68.

Com o investimento inicial (Inv.inicial) de R\$ 63.801,60, a economia anual de R\$ 1.239,68, a taxa de inflação (i) de 4,5%_{aa}, estipulada pelo Conselho Monetário Nacional para 2012 (CMN, 2012), e o período de vida útil do empreendimento (n) coincidindo com a vida útil dos painéis solares que é de 30 anos, pode-se calcular o período de retorno simples (equação 11), o fator de recuperação de capital (equação 12) e o período de retorno descontado (equação 13), mostrados na Tabela 5.



Tabela 5 – Período de retorno simples e descontado

FRC _(d,n)	0,1060
PRS (anos)	51,46
PRD (anos)	163,79

Fonte: Autoria própria.

Considerando a inflação (i), para 2012, de 4,5%_{aa} (CMN, 2012), a taxa de desconto (d) de 10%_{aa} para equipamentos elétricos (Costa e Costa, 2000; Marine, 2002), a vida útil dos módulos sendo de 30 anos e a vida útil dos inversores sendo de 10 anos, podemos obter os valores para o custo do ciclo de vida (CCV) e do custo do ciclo de vida anualizado (CCVA) como mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo do custo do ciclo de vida anualizado

Variáveis	Valor
X (adimensional)	0,95
P _a (adimensional)	15,70
Inv.inicial (R\$)	63.801,60
VP1 ₁₀ (R\$)	4.804,27
VP1 ₂₀ (R\$)	2.876,49
VP2 (R\$)	3.141,44
CCV (R\$)	74.623,80
CCVA(R\$)	5.000,97

Fonte: Autoria própria.

Com o custo do ciclo de vida anualizado (CCVA) de R\$ 5.000,97 (Tabela 6) e a energia gerada anualmente (E_g) de 3.776,53 kWh (Tabela 4) o custo da energia economizada (CEE) ou gerada (CEG) é de R\$ 1,3242/kWh (equação 20).

Utilizando-se as equações 21, 22, 23 e 24, pode-se calcular o subsídio necessário para que ao final da vida útil (30 anos) o projeto não dê prejuízo. Este subsídio deve ser de aproximadamente R\$ 1,4642/kWh.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Observa-se que o custo da energia gerada pelo sistema fotovoltaico dimensionado é quatro vezes superior à tarifa cobrada pela concessionária de energia local por quilowatt-hora consumido (R\$ 0,32883/kWh).

Segundo Oliveira (2007) e Monteiro (2007) a utilização de rastreador solar em um eixo garante ganhos da ordem de 15 a 40% na geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos, sendo valores de ganhos mais comuns da ordem de 25%. Então, com investimento de aproximadamente R\$ 2.000,00 na implantação de sistema de rastreamento solar a produção de energia elétrica anual passaria para aproximadamente 4.720,66 kWh, ou seja, a energia seria gerada ao custo de R\$ 1,0593/kWh, 3,2 vezes o valor cobrado pela concessionária de energia local.

Buscando a redução do custo da geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos e com isso tornando-os viáveis e competitivos do ponto de vista econômico, pode-se trabalhar com três alternativas:

A primeira seria a criação de linhas de créditos para sistemas fotovoltaicos, uma vez que a maioria dos equipamentos é importada e isso encarece o custo de aquisição dos mesmos.

A segunda alternativa seria a criação de subsídios que contemplassem sistemas fotovoltaicos. No caso do sistema fotovoltaico fixo o subsídio necessário seria de aproximadamente R\$ 1,4642/kWh e para sistema rastreado seria de aproximadamente R\$ 1,1051/kWh, valores que garantem que ao final dos 30 anos o empreendimento não acarretará prejuízo.

A terceira alternativa e talvez a mais importante, seria o incentivo ao desenvolvimento da indústria nacional dos equipamentos, que além de promover a redução dos custos de aquisição dos mesmos, criaria novos postos de trabalho, já que são gerados de 29.580 (REPP, 2001) a 107.000 (Perez, 2001) postos de trabalho por Terawatt-hora gerados (TWh).

Sendo assim, mesmo levando-se em conta o forte apelo ambiental inserido pela geração fotovoltaica de energia, fica clara a necessidade de incentivos e subsídios governamentais que derrubem a barreira econômica existente, possibilitando assim o desenvolvimento em larga escala de projetos fotovoltaicos para a geração de energia elétrica.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. Departamento Nacional de Aquecimento Solar. Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar. Abril de 2008, 138 p.

BCB - Banco Central do Brasil. Disponível em <www.bcb.gov.br>. Acesso em 23 fev. 2012.

Bennett, I. Monthly Maps of Mean Daily Insolation for United States. Solar Energy, v. 9, p. 145-158, 1965.

CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. Disponível em <www.cpa.unicamp.br>. Acesso em 23 de fev. 2012.

CRESESB – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB. 1999.

CMN – Conselho Monetário Nacional. Disponível em <www.fazenda.gov.br>. Acesso em 23 fev. 2012.

Collares-Pereira, M.; Rabl, A. The average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy, v. 22 (2), p.155-164, 1979.

Costa, H. S.; Costa, R. A. L. Análise comparativa econômica entre diferentes opções para a eletrificação domiciliar rural. Revista Econômica do Nordeste, v. 31, n. 3, p. 320-328, Fortaleza, jul. - set. 2000.

CPFL Paulista – Companhia Paulista de Força e Luz. Disponível em <www.cpfl.com.br>. Acesso em: 23 fev. 2012.

Cunha, J. L. P. A. Eletrificação de edificações rurais isoladas utilizando energia solar fotovoltaica. 2006. 53 p. Tese (Curso de Pós-graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia para a obtenção do título de especialista) – UFLA/MG, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Duffie, J. A.; Beckman, W. A. Solar engineering of thermal processes. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

Lisita Júnior, O. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso de 3 kWp instalado no estacionamento do IEE-USP. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia/Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração /Instituto de Física da Universidade de São Paulo – USP, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Lorenzo, E. Retratos de la conexión fotovoltaica a la rede (IV): Seguidores y huertas solares. Era Solar. Madrid: nº 119, p. 06-23, Marzo/Abril2004. Disponível em <www.fotovoltaica.com/retrato4.pdf>. Acesso em 20 jun. 2004.

Marine, J. A. Desenvolvimento de programa computacional para projeto de sistemas fotovoltaicos no suprimento de eletricidade a pequenas comunidades rurais. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2002.

Monteiro, F. A. M. Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar. Recife, 2007, 67 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2007.

Oliveira, C. A. A. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. Recife, 2007, 80 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2007.

Osis, L. R. Alimentação de motores para refrigeração doméstica utilizando energia solar fotovoltaica. 2007. 80 p. Tese (Curso de Pós-graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia para a obtenção do título de especialista) – UFLA/MG, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Pereira, J. C. Avaliação do potencial energético solar da região autônoma da Madeira. Agência Regional de Energia e Ambiente da Região Autônoma da Madeira (AREAM), relatório final, Agosto de 2005.

Perez, E. M. Energías Renovables, Sustentabilidad y Creacion de Empleo: Una Economía Impulsada por el Sol. Catarata: Madri, 2001, 270 p.

REPP (2001). The work that goes into renewable energy. Renewable Energy Policy Project, research report number 13, Washington, 2001. Disponível em <www.repp.org>.



Santos, C. B.; Sauer, I. L. Sumario metodológico do estudo de planejamento integrado de recursos para o sistema elétrico de Boa Vista – RR. São Paulo, IEE-USP, 1998.

Vianello, R. L.; Alves, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1991, 449 p.