

DIMENSIONAMENTO E CUSTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PUROS E HÍBRIDOS NAS DIVERSAS RADIAÇÕES DO BRASIL

Rodolfo Damásio de Castro – rodolfo.dago@gmail.com

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica

Ennio Peres da Silva – lh2ennio@ifi.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física Gleb Wataghin

Resumo. Foi realizado um estudo comparativo analisando alguns aspectos da microgeração residencial solar fotovoltaica e solar híbrida (geração solar fotovoltaica e geração solar térmica). Utilizou-se como valores da radiação solar os dados fornecidos pelo Atlas Solarimétrico do Brasil da radiação solar diária, média global, em todo o país. Também foi realizado um estudo do percentual do gasto residencial de energia elétrica referente ao chuveiro elétrico para cada região do país, observando suas particularidades. O estudo deu ênfase na classe mais alta de consumo de energia elétrica, segundo os dados fornecidos por pesquisa do PROCEL, ou seja, residências que apresentam consumo mensal médio acima de 1,1 GJ (300 kWh). O dimensionamento dos sistemas levou em conta a necessidade residencial de água quente e energia elétrica e a radiação solar média do local. Estimou-se o custo de cada sistema em particular e chegou-se à conclusão de que o sistema solar híbrido é economicamente mais viável, podendo ficar em torno de 3 a 13 % mais barato, dependendo do consumo mensal médio da residência e de sua localidade.

Palavras-chave: microgeração distribuída, custos, sistema fotovoltaico, coletores solares.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os sistemas fotovoltaicos de geração distribuída ainda não configuram uma alternativa economicamente viável no Brasil, apesar dos elevados níveis de insolação presentes no país, devido ao maior preço da energia elétrica solar em relação à eletricidade disponível na rede do Sistema Interligado Nacional (SIN). Entretanto, segundo alguns estudos, o preço da energia elétrica produzida por painéis fotovoltaicos (PVs) não está longe de se tornar próximo do preço da eletricidade da rede, o que fará que seu mercado cresça sem a necessidade de intervenções governamentais. Tal previsão torna necessário o empenho em pesquisas e estudos a respeito das características técnicas, econômicas e energéticas desta forma alternativa de geração que, além de apresentar menores impactos ambientais que a forma usual de obtenção de energia elétrica (hidroelétrica, principalmente), apresenta um grande potencial ainda a se aproveitar no país.

Outra forma de obtenção de energia solar mais comumente utilizada no Brasil é através dos coletores solares planos. Estes, diferentemente dos PVs, não transformam a energia solar em energia elétrica, porém servem para aquecimento de água, principalmente na utilização doméstica em torneiras e chuveiros, ou para o aquecimento de piscinas.

É possível, em uma residência, realizar a instalação de sistemas híbridos, ou seja, sistemas que apresentam tanto a geração solar fotovoltaica quanto a geração solar térmica. Dessa forma, acrescenta-se o investimento nos coletores, mas diminui-se o número de painéis necessários, o que pode significar uma vantagem, já que os módulos fotovoltaicos ainda apresentam preços relativamente altos e os chuveiros um consumo elevado.

O sistema híbrido estudado é composto por uma geração elétrica conectada à rede, composta pelos módulos fotovoltaicos (juntamente com os outros equipamentos necessários para a adaptação do mesmo, como inversores, fios e estrutura de instalação) e pela geração térmica, composta por coletores solares (juntamente com os outros equipamentos necessários para a instalação como estrutura, tubulações de água quente e reservatório térmico).

Neste trabalho, estudou-se alguns aspectos da geração híbrida e da geração solar fotovoltaica nas cinco regiões do Brasil em suas diferentes intensidades diárias médias anuais de radiação solar, de acordo com os dados do Atlas Solarimétrico do Brasil de Tiba et al. (2000), disponível na Fig. 1. Objetivou-se encontrar a necessidade média em kW_p de um sistema fotovoltaico capaz de abastecer toda a necessidade energética da residência, sem e com coletores (sistema híbrido), para alguns níveis de consumo de energia elétrica nessas regiões. Devido ao elevado investimento para a instalação dos sistemas, levou-se em consideração as residências com um consumo de energia elétrica equivalente ao consumo das classes sociais de maior renda, ou seja, da ordem de 1,1 GJ (300 kWh) por mês ou mais.

As conversões dos valores apresentados na Fig. 1 para valores do SI (W/m²) estão apresentados na Tab. 1.

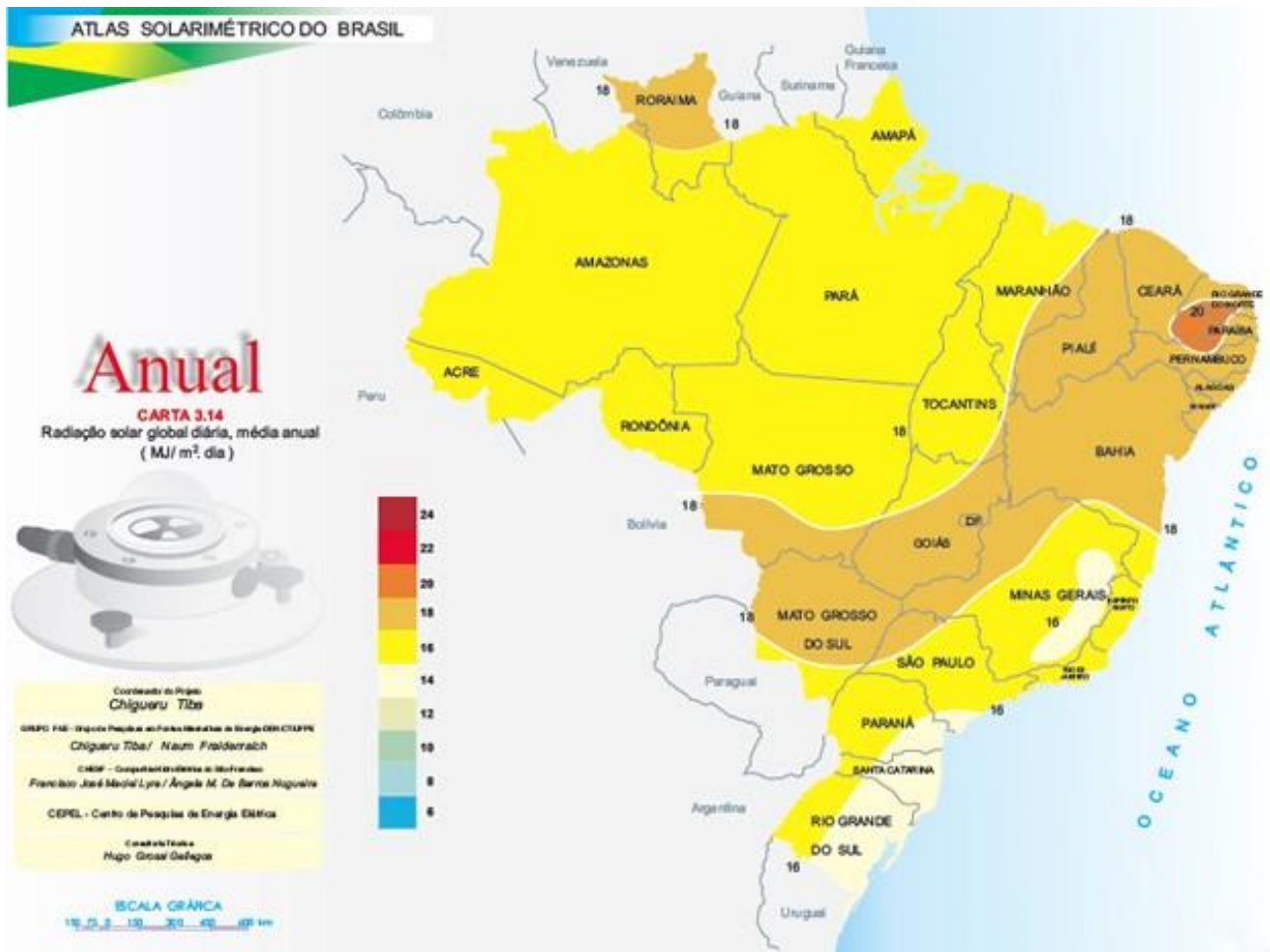


Figura 1 – Atlas Solarimétrico do Brasil: Radiação solar global diária, média anual.

Tabela 1 – Transformação dos níveis de radiação em MJ/m².dia em W/m².

MJ/m ² .dia	W/m ²
14	162,0
16	185,2
18	208,3
20	231,5

Fonte: Elaboração própria

2. METODOLOGIA

2.1 Características das residências

Segundo a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia - ano base 2005 (Fig. 2) realizada pelo Procel, cerca de um quarto de toda a energia consumida nas residências do país é destinada ao chuveiro elétrico. Entretanto, para as regiões Norte e Nordeste esse número é muito menor, correspondendo a 2 % e 9 % respectivamente.

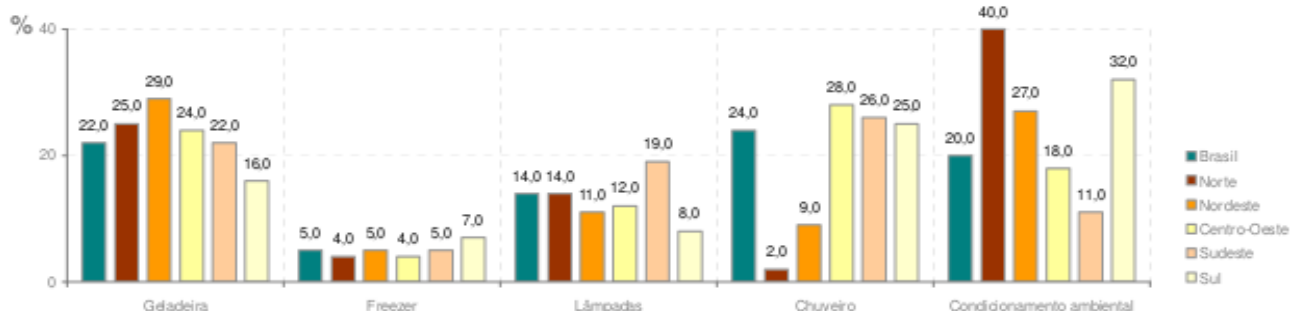


Figura 2 - Participação dos equipamentos no consumo final de energia elétrica no Brasil e Regiões

Fonte: PROCEL, 2007

Esses valores, por serem médios, não retratam bem a porcentagem de consumo do chuveiro na residência de classe mais alta que o possui. Chegou-se a essa conclusão analisando a quantidade de residências em cada região que utiliza o chuveiro elétrico, visto que no Norte, apenas 12,1% das residências que consomem mais de 1,1 GJ por mês usam o chuveiro elétrico, e na região Sul, esse número sobe para 97,8% e também pelo fato de que os dados do consumo final não são divididos por classe de consumo.

Segundo a mesma pesquisa do Procel, residências que consomem mais de 1,1 GJ (300 kWh) por mês possuem em média 4,17 habitantes no Sudeste, 3,85 no Sul, 3,58 no Centro-Oeste, 4,17 no Nordeste e 4,09 no Norte. Para estimar o consumo de água durante os banhos de cada morador, utilizou-se os valores indicados pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, segundo os quais o consumo de água nos chuveiros elétricos deve ser de, aproximadamente, entre 45 litros (banho longo de 15 minutos) e 15 litros (banho curto de 5 minutos) (SABESP, sem data). O valor utilizado nos cálculos foi de 30 litros por banho de média duração. Considerando-se que cada habitante toma de um a dois banhos por dia, utilizou-se a média de 1,5 banhos por dia por habitante. Assim, cada habitante consome por dia 45 litros.

Para obter maior precisão nos cálculos do consumo do chuveiro, utilizou-se uma potência média de aproximadamente 2.600 W. Multiplicando essa potência pelo número de habitantes médio de cada residência, o tempo médio de banho por pessoa a cada dia, considerado 600 segundos (10 minutos), e o número de dias em um mês (30), chegou-se ao valor do consumo do chuveiro elétrico em cada residência. A Tab. 2 apresenta o consumo médio, em GJ, do chuveiro elétrico nas residências de cada região.

Tabela 2 – Consumo médio do chuveiro elétrico por residência de cada região.

Região	Consumo (GJ)
Sudeste	0,30
Sul	0,27
Centro-Oeste	0,25
Norte	0,29
Nordeste	0,30

Fonte: Elaboração própria.

2.2 Vida útil dos equipamentos

Sistema Fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos são produtos que apresentam uma perda de eficiência com o passar do tempo. Para calcular a energia total gerada por um módulo ao longo de sua vida útil, é necessário conhecer a taxa de degradação do mesmo. Segundo Skoczek et al. (2008), a taxa de degradação da máxima potência gerada dos módulos de silício mono e policristalino é em torno de 0,8% ao ano. Segundo nota técnica do EPE (2012), a vida útil de uma instalação fotovoltaica é de cerca de 20 anos. Com a taxa de degradação, conseqüentemente, o sistema estará produzindo energia a uma eficiência em torno de 85% da inicial.

Sistema de Aquecimento Solar

No trabalho de Salazar (2004), os sistemas de aquecedor solar residencial tem uma vida útil de aproximadamente 20 anos. Para facilidade dos cálculos, utilizou-se no estudo o período de 20 anos, igualmente ao do sistema fotovoltaico. Assim, o fim do período de utilização de um sistema irá coincidir com o outro. Não se supôs taxa de degradação para os

coletores solares e nem para os reservatórios térmicos.

2.3 Dimensionamento

Sistema Fotovoltaico

O sistema de aquecimento de água para o banho é capaz de fornecer cerca 70% da energia necessária para tal fim (Cidades Solares, 2008). Sendo assim, os 30% restantes ficam a cargo de outro sistema de aquecimento. Trabalhou-se com o uso de um reservatório térmico com apoio elétrico do sistema de aquecimento solar sendo, então, o responsável por fornecer essa demanda.

Nos sistemas fotovoltaicos, a intenção de quem os utiliza para uma geração distribuída é eliminar a necessidade de pagar contas de luz. Dessa forma, espera-se que no fim da vida útil do sistema, no relógio contador de energia, que deve ser adaptado no caso para um relógio bidirecional, o ponteiro do mesmo esteja marcando que toda a energia inserida à rede é igual à energia consumida da rede – portanto, o relógio deve estar na posição zero. Para isso, levou-se em conta a taxa de degradação média de módulos de silício mono e policristalino, que correspondem aos modelos de PVs mais comuns no mercado.

A produção total de energia pelos painéis fotovoltaicos durante toda sua vida útil – que como visto deve também ser igual ao consumido pelo usuário (sem os 70% do chuveiro no caso do sistema híbrido) – é dada conforme a Eq. (1).

$$E_T = \sum_{i=1}^{20} E_{ti}, \quad (1)$$

sendo E_T a energia total consumida pelo usuário nos 20 anos e E_i a energia gerada pelo sistema fotovoltaico no ano i . Aplicando a degradação d na produção de energia dos PVs, chega-se à Eq. (2).

$$E_T = E_{t1} \times \sum_{i=1}^{20} (1-d)^{i-1} \quad (2)$$

sendo E_{t1} a energia produzida no primeiro ano de utilização, quando não há perdas por degradação dos módulos.

Inicialmente encontrou-se o valor de E_{t1} , a partir da potência nominal necessária na residência e dos níveis da radiação solar média de cada região considerada. A produção de energia no primeiro ano de utilização é dada conforme a Eq. (3).

$$E_{t1} = 31.536 \times P \times H \quad (J) \quad (3)$$

sendo P a potência nominal do sistema em W_p – valor obtido através da potência sob uma radiação padrão de 1.000 W/m^2 –, H a radiação média da região em W.m^2 e o coeficiente sendo o resultado da divisão do tempo de um ano em segundos ($31.536.000$) pela radiação nominal de padronização (1.000).

Como foi visto, trabalhou-se com o sistema fotovoltaico sendo responsável por fornecer energia para abastecer toda a casa – juntamente com 30% do consumo do chuveiro elétrico no caso do sistema híbrido – em valores absolutos de energia ao final da vida útil do equipamento. Assim, supondo um consumo médio mensal de energia elétrica C ($>1,1 \text{ GJ}$) tem-se um consumo de $240C$ no fim da vida útil dos módulos para o sistema fotovoltaico puro. No caso do sistema híbrido, para cada região tem-se um valor diferente da produção de energia elétrica da parte fotovoltaica, que deve ser obtido retirando-se 70% do consumo referente ao chuveiro elétrico. Substituindo os valores da taxa de degradação no somatório da Eq. (2), resulta que a energia a ser produzida no primeiro ano de utilização dos painéis E_{t1} é igual a aproximadamente $12,84C$ para o sistema fotovoltaico puro

Adotou-se o preço dos sistemas fotovoltaicos a partir do valor utilizado na nota técnica do EPE (2012) para sistemas de $4-6 \text{ kW}_p$, da ordem de $\text{R\$ } 8,00/\text{W}_p$.

Sistema de Aquecimento Solar

Os coletores solares são produtos comercializados em grande parte das vezes em kits. Nesses, o usuário adquire em uma só compra todos os componentes necessários para a instalação dos mesmos, ou seja, os coletores solares, os reservatórios – onde alguns apresentam uma resistência interna para garantir o aquecimento da água na falta de Sol e outros apenas isolam termicamente a água quente – e a instalação. Como visto, o sistema de coletores solares, segundo pesquisas (Cidades Solares, 2008) não são capazes de fornecer 100% da energia, sendo necessário a complementação com outra forma de geração. Escolheu-se, então, utilizar o uso de reservatório com apoio elétrico, onde este fornecerá no aquecimento da água 30% da energia que era consumida no chuveiro, sendo o sistema fotovoltaico responsável por gerar essa energia.

Segundo a Abrava (2010) o custo de um kit completo junto com a instalação para um sistema de aquecimento solar de 200 litros custa em média $\text{R\$ } 1.700,00$.

3. RESULTADOS

3.1 Sistema Fotovoltaico Puro

Neste sistema de geração puramente fotovoltaica, o sistema adotado é responsável por suprir 100% da necessidade de energia elétrica na residência, incluindo o uso do chuveiro. Dessa forma, só será relevante as diferenças dos níveis de radiação da localidade de cada residência. De posse das necessidades de geração de energia em função do consumo médio mensal das residências, calculou-se, utilizando a Eq. (3), a necessidade em kW_p em função do consumo médio mensal. Os resultados são apresentados na Fig. 4 para os quatro valores diferentes de radiação solar.

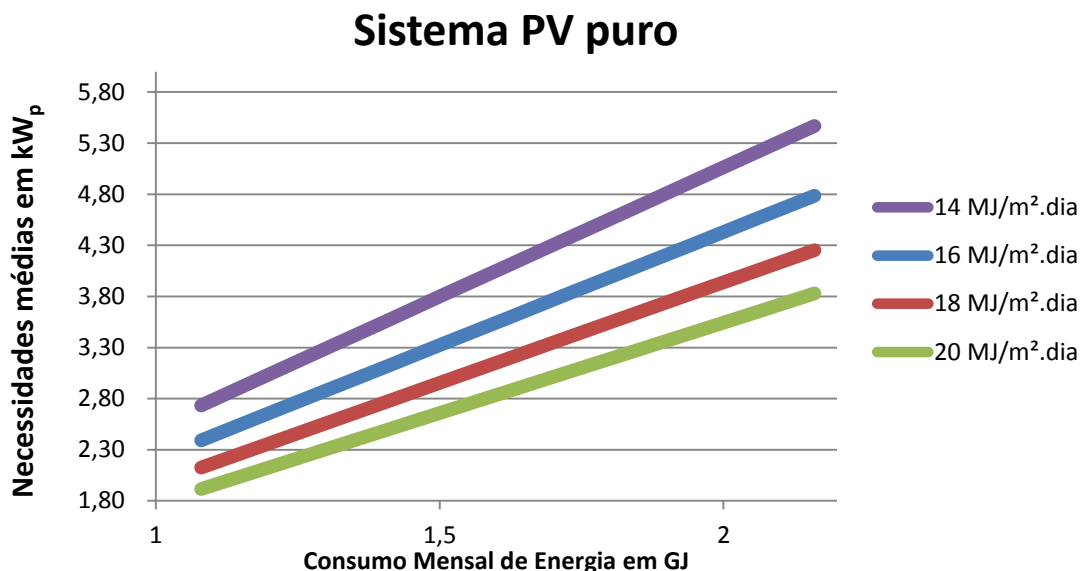


Figura 4 – Necessidades em kW_p de painéis fotovoltaicos em função do consumo médio mensal e dos níveis de radiação diária média anual. Fonte: Elaboração própria.

Os custos dos sistemas para cada região foram obtidos multiplicando o preço do W_p sugerido pela potência do sistema. A Fig. 5 mostra o preço dos sistemas para cada região e consumo médio mensal.

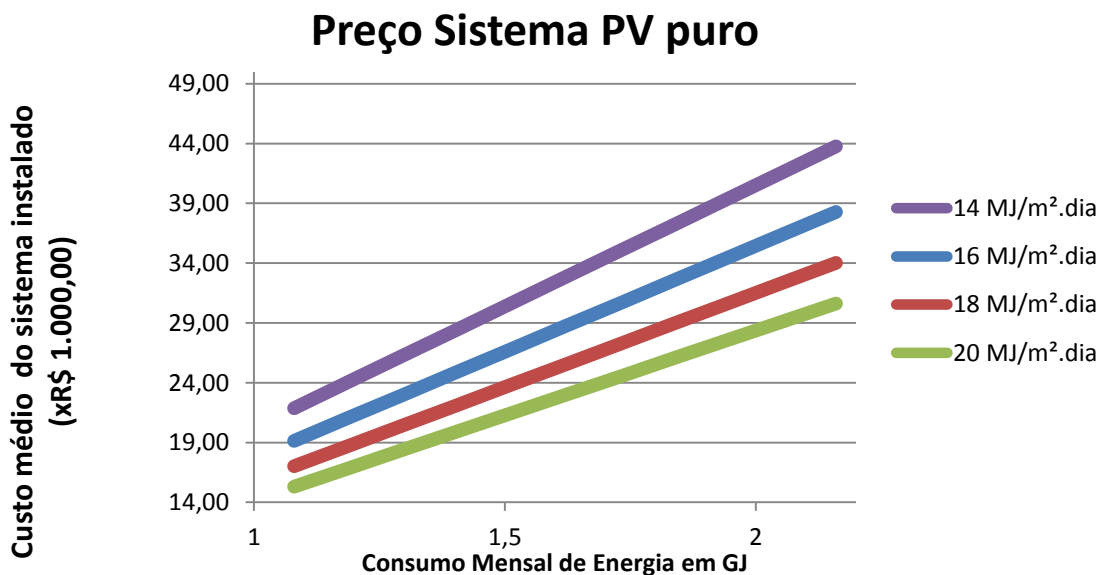


Figura 5 – Custo do sistema fotovoltaico puro por consumo e consumo mensal médio. Fonte: Elaboração própria.

3.1 Sistema Híbrido

Neste caso, as diferenças regionais entram em consideração pois, como foi visto, o consumo do chuveiro elétrico nas residências pode apresentar variações relevantes de acordo com sua localização. Dessa forma, calculou-se as necessidades de acordo com a região e níveis de irradiação solar. A Fig. 6 apresenta os resultados da necessidade em kW_p das regiões Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Centro-Oeste respectivamente.

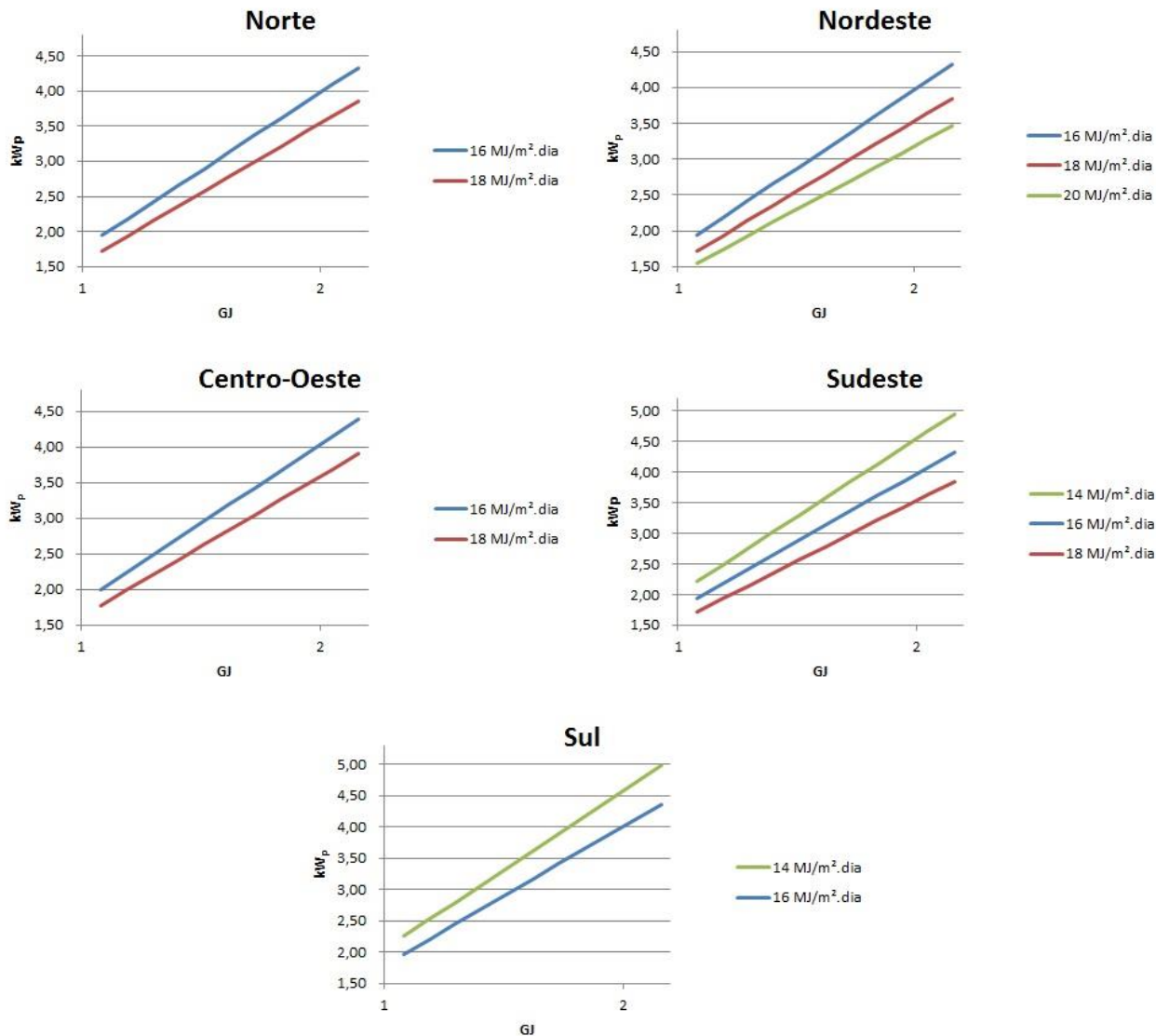


Figura 6 – Gráficos por região e nível de radiação da necessidade em kW_p de PVs no sistema híbrido.
Fonte: Elaboração própria.

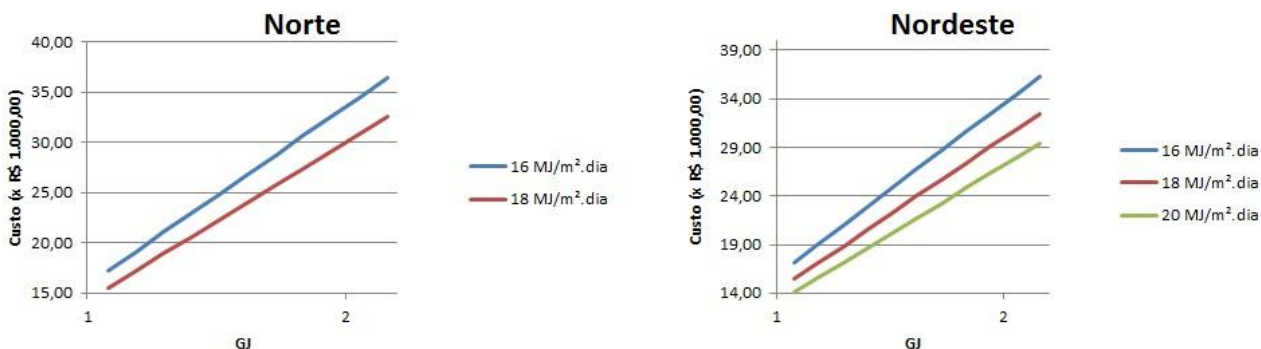


Figura 7 – Gráficos por região e nível de radiação do custo do sistema híbrido instalado.

Fonte: Elaboração própria.

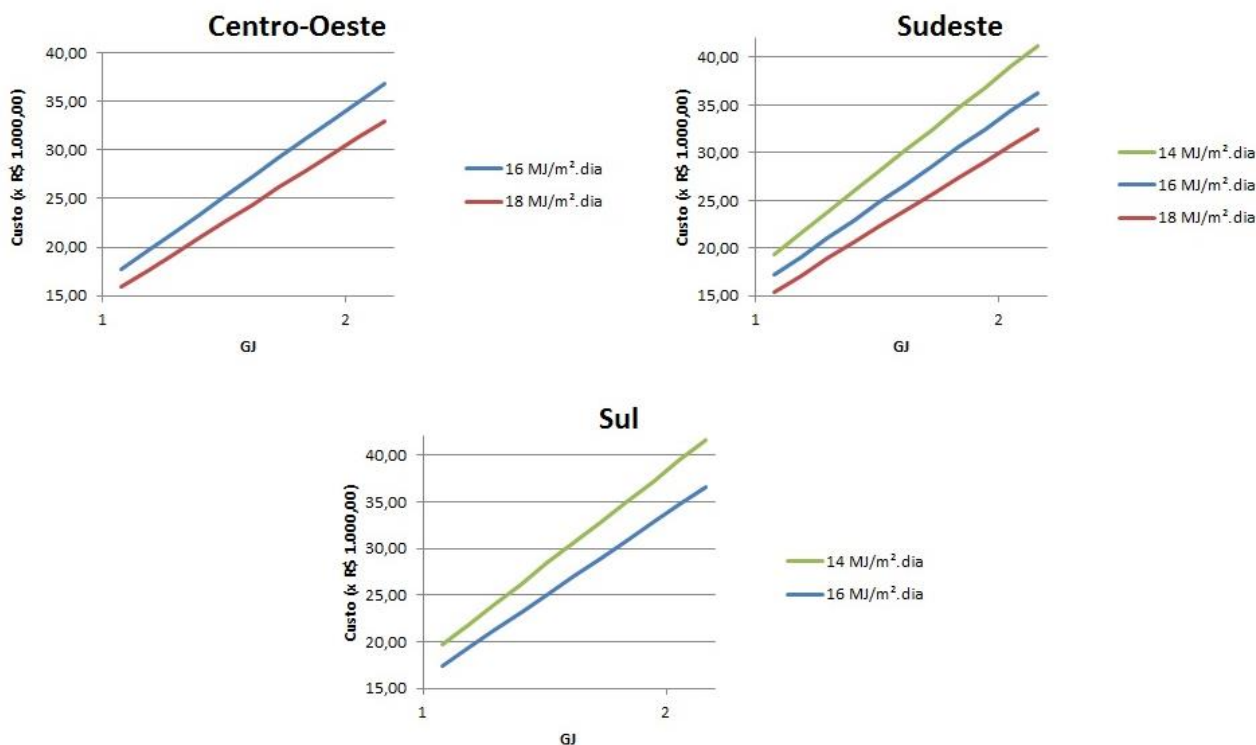


Figura 7 – (Continuação) Gráficos por região e nível de radiação do custo do sistema híbrido instalado.
Fonte: Elaboração própria.

A diferença de custo entre o sistema fotovoltaico puro e o sistema híbrido que atende as necessidades dos usuários nas quatro regiões é mostrada na Fig. 8.

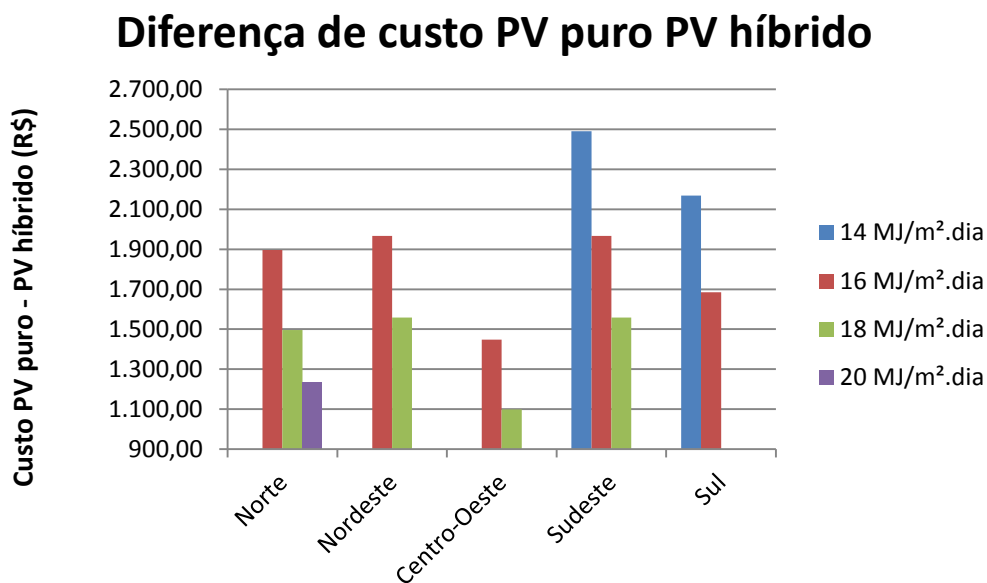


Figura 8 – Diferença de custo entre o sistema de PV puro e o sistema híbrido por região e nível de radiação solar.
Fonte: Elaboração própria.

4. DISCUSSÕES

Ambos os sistemas suprem as necessidades do usuário, tanto para o uso de eletrodomésticos, quanto para o aquecimento de água para o banho. Entretanto, o sistema híbrido, devido ao elevado custo dos PVs, se mostrou

economicamente mais viável. Avaliou-se que a diferença entre os dois sistemas varia de 3-6% do custo do sistema híbrido para os que consomem cerca de 2,2 GJ mensalmente e de 7-13% do custo do sistema híbrido para os que estão mais próximos do limite da faixa, consumindo cerca de 1,1 GJ por mês.

Outro fator relevante do uso do sistema híbrido é que o chuveiro elétrico representa uma importante parcela da carga da rede nos horários de pico e os coletores solares podem atuar na redução dessa carga, diminuindo a necessidade de horários de verão, os riscos de apagões, reduzir a necessidade de instalação de novas usinas elétricas, sejam elas hidroelétricas ou termelétricas, que apresentam grandes impactos sociais e ambientais. Vantagem esta que não pode ser esperada de sistemas puramente fotovoltaicos conectados à rede, pois o horário de pico, ou seja, das 18 h até as 21 h, não coincide com o horário de produção de energia dos PVs. Uma alternativa a isso seriam os bancos de bateria, que carregariam durante o dia e descarregariam à noite, entretanto, a compra dessas deixaria o sistema ainda mais caro, aumentando a competitividade mais ainda o sistema híbrido.

5. CONCLUSÃO

Como foi visto, a energia solar térmica e fotovoltaica configura uma alternativa de geração com impactos ambientais reduzidos e o Brasil é um país com um grande potencial ainda a se explorar dessa fonte. Ainda dependente de políticas públicas para o seu crescimento, os PVs apresentam taxa de crescimento elevadas em vários países.

De acordo com os cálculos realizados no trabalho, chegou-se que para atender toda a demanda de energia elétrica de uma residência de alto padrão de consumo de eletricidade com um sistema de painéis fotovoltaicos no Brasil, seria demandado um sistema de 1,8 kW_p a 5,5 kW_p, variando conforme a localização da residência e o consumo mensal médio. O custo de tal sistema instalado variou entre cerca de R\$ 15.000,00 e R\$ 44.000,00, dependendo também da localização da residência e do consumo mensal médio.

O sistema híbrido estudado, composto por um sistema de geração elétrica fotovoltaica juntamente com um sistema de aquecimento solar da água para o banho, que também atendam às necessidades do usuário, mostrou-se mais econômico. O custo de todo o sistema instalado variou de R\$ 14.000,00 até R\$ 41.500,00, representando economias que variam de R\$ 1.000,00 a R\$ 2.500,00, conforme a região e radiação local.

Além dessas vantagens financeiras que o sistema híbrido apresenta, devido ao elevado custo dos PVs, foi visto também que este colabora para uma redução considerável na carga da rede do Sistema Interligado Nacional, já que diminui a necessidade de utilização do chuveiro elétrico, que muitas vezes se dá no horário de pico.

REFERÊNCIAS

- DASOL/ABRAVA – Departamento Nacional de Aquecimento Solar. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/2010/10/investimento-em-aquecedor-solar-e-sinonimo-de-lucro/>>. Data de acesso: Novembro de 2013.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro, 2012.
- Iniciativa Cidades Solares – Disponível em: <http://www.cidadessolares.org.br/conteudo_view.php?id=306>. Acesso em outubro de 2013.
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posses de Equipamentos de Hábitos de Consumo – Ano Base 2005 – Classe Residencial Relatório Sudeste. Gráfica da Eletrobrás -DAAP, Rio de Janeiro, 2007
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posses de Equipamentos de Hábitos de Consumo – Ano Base 2005 – Classe Residencial Relatório Sul. Gráfica da Eletrobrás -DAAP, Rio de Janeiro, 2007
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posses de Equipamentos de Hábitos de Consumo – Ano Base 2005 – Classe Residencial Relatório Norte. Gráfica da Eletrobrás -DAAP, Rio de Janeiro, 2007
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posses de Equipamentos de Hábitos de Consumo – Ano Base 2005 – Classe Residencial Relatório Centro-Oeste. Gráfica da Eletrobrás -DAAP, Rio de Janeiro, 2007
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posses de Equipamentos de Hábitos de Consumo – Ano Base 2005 – Classe Residencial Relatório Nordeste. Gráfica da Eletrobrás -DAAP, Rio de Janeiro, 2007
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=2&temp2=3&proj=sabesp&pub=T&nome=Uso_Racional_Agua_Generico&db=&docid=DAE20C6250A162698325711B00508A40>. Acesso em outubro de 2013.
- Salazar, J. P. de L. C., 2004., Economia de energia e redução do pico da curva de demanda para consumidores de baixa renda por agregação de energia solar térmica, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.
- Skoczek, A., Sample, T., Dunlop, E. D., 2008. The results of performance measurements of field-aged crystalline silicon photovoltaic modules. Wiley InterScience.
- Tiba, Chiguero et al., 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPTEL/Eletrobrás e Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.

-sizing and cost of pure and hybrid photovoltaic systems in the various radiation of Brazil

Abstract. It was conducted a comparative study analyzing some aspects of solar photovoltaic and solar hybrid residential microgeneration (solar photovoltaic generation and solar thermal generation) was performed . Was used as

values of solar radiation data provided by Solarimetric Atlas of Brazil of daily solar radiation , global media across the country . A study of the percentage of residential electric power expense related to electric shower for each region of the country , noting their peculiarities was also performed . The study emphasized in the highest class of electricity consumption , according to figures provided by research PROCEEL , ie homes that have an average monthly consumption above 1.1 GJ (300 kWh) . The sizing of the systems took into account the need for residential hot water and electricity and the average solar irradiance site . Estimated the cost of each particular system and came to the conclusion that the solar hybrid system is more economically viable , which may be around 3-13 % cheaper , depending on the average monthly consumption of residence and their Location .

Key words: distributed microgeneration costs, photovoltaic systems,solar heater.