



Políticas Energéticas para a Sustentabilidade
25 a 27 de agosto de 2014
Florianópolis – SC

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ASSOCIADA À REDUÇÃO DE PICOS DE DEMANDA DIURNOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Henrique Marin Campos¹
Ana Katherine Rodriguez²
Jair Urbanetz Junior³
Eloy Fassi Casagrande Junior⁴

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar o potencial da geração fotovoltaica para reduzir os picos de demanda diurnos ocasionados, de forma significativa, pelo uso de equipamentos de ar-condicionado. A utilização destes equipamentos teve contribuição significativa para desencadear o pico de demanda de potência às 14:29 do dia 06 de fevereiro, na região sul, equivalente a 17.971 MW. Este horário é divergente dos horários de pico de demanda no restante do ano, que ocorre, aproximadamente, entre as 18 e 19 horas. Esse perfil de demanda é característico do verão e, quando comparado à curva de geração fotovoltaica para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCRs), pode-se constatar a coincidência de aumento da geração fotovoltaica no verão. Isso fica evidente, pois essa geração é diretamente proporcional à irradiação incidente, que possui seus maiores valores no mesmo período. Quando se compara os meses de janeiro e fevereiro de 2012 e 2013, em relação a 2014, nota-se um aumento de 14,3% em janeiro e 5,8% em fevereiro na irradiação, o que culminou com um aumento de produtividade dos SFVCRs, tal como o Sistema Fotovoltaico de 2,1 kWp existente no Escritório Verde (EV). O EV é

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, enghenrique@outlook.com, (41) 9696-6508.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, anakt07@hotmail.com, (41) 9221-3143.

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, urbanetz@utfpr.edu.br, (41) 9833-5729.

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, eloy.casagrande@gmail.com, (41) 9982-9747

uma edificação modelo em sustentabilidade e sediada na Universidade Tecnológica Federal de Paraná (UTFPR), câmpus Curitiba, em que a geração fotovoltaica foi equivalente a 506,2 kWh, nos meses de janeiro e fevereiro de 2014. O método utilizado nesta pesquisa foi a comparação entre a curva de geração fotovoltaica mensal do EV, a curva de irradiação diária média mensal, obtida do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o SFVCR do EV, e a curva de demanda mensal do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo constatado que o pico de geração fotovoltaica coincidiu com o pico de demanda, justificando o potencial estratégico da energia solar fotovoltaica para reduzir o pico de demanda diurno existente. Como resultado, obteve-se que um painel fotovoltaico de silício policristalino, mesma tecnologia presente no EV, com cerca de 1,95 kWp é capaz de compensar o consumo de energia de um equipamento de ar-condicionado, nos meses de verão, para refrigerar um cômodo de 10 m² de uma residência ou comércio na cidade de Curitiba. Esse trabalho pretende concluir que a instalação de geradores fotovoltaicos distribuídos, localizados na cobertura de edificações, apresenta um potencial estratégico para o sistema elétrico brasileiro, pois reduzem os picos de demanda diurnos, típicos de verão, suprindo a energia elétrica necessária para o funcionamento de condicionadores de ar. Dessa forma, há um aumento da eficiência energética, devido a geração estar localizada no local de consumo, além de maior confiabilidade no suprimento de energia e a possibilidade de redução e postergação de investimentos em infraestrutura do sistema elétrico.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, picos de demanda, sistema elétrico, eficiência energética.

ABSTRACT

The objective of this paper is to present the potential of photovoltaic generation to reduce peak daytime demand caused significantly, by the use of air-conditioning equipment. The use of such equipment had significant contribution to unleash the peak power demand at 14:29 on 06 February in the southern region, equivalent to 17,971 MW. This time is different from the peak demand in the rest of the year, occurring approximately between 18 and 19 hours. This demand profile is characteristic of the summer and, when compared to the photovoltaic generation curve for Photovoltaic Systems Connected to Power Grid (SFVCRs), one can note the coincidence of increased photovoltaic generation in the summer. This is evident because this generation is directly proportional to the incident radiation, which has its highest values in the same period. When comparing the months of January and February 2012 and 2013, compared to 2014, we observe an increase of 22.5 % in January and 15.1 % in February on irradiation, which resulted in an increase of

productivity in SFVCRs , such as photovoltaic System 2.1 kWp existing in the Green Office (EV). EV is a building model based on sustainability situated in the Federal University of Technology of Paraná (UTFPR), Curitiba campus, where the photovoltaic generation was equivalent to 506.2 kWh in January and February 2014. The method used in this study was the comparison between the curve of monthly photovoltaic generation in the EV, the curve of monthly average daily irradiation, obtained from the database of the National Institute of Meteorology (INMET) to the Green Office photovoltaic panel, and monthly demand of the National Interconnected System (SIN) curve, that revealed that the peak photovoltaic generation coincided with the peak demand, justifying the strategic potential of photovoltaics systems to reduce peak existing daytime demand. As a result, it was found that a PV panel polycrystalline silicon, the same technology in EV, with about 1.95 kWp is able to compensate the energy consumption of equipment for air conditioning in summer months to cool a room of 10 m² for a residence or business in the city of Curitiba. This work aims to conclude that the installation of distributed PV generators, located on the roof of buildings, presents a strategic potential for the Brazilian electric system because they reduce peak daytime demand, typically observed in the summer, supplying the electricity required for the operation of conditioning air. Thus, there is an increase of energy efficiency due to generation be located at the place of consumption and greater reliability of energy supply and the possibility of reduction and postponement of investments in the electric system infrastructure.

Keywords: Photovoltaic solar energy, peak demand, electrical system, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

No ano de 2012 a geração fotovoltaica teve um aumento de 31,1 GW de capacidade instalada, sendo 17,2 GW na Europa. A capacidade mundial acumulada em potência fotovoltaica no ano de 2013 foi equivalente a 136,7 GW. No Brasil, a capacidade instalada de geração fotovoltaica é equivalente a 9,4 MW, através de 106 unidades geradoras (GMO, 2014; ANEEL, 2014).

O que foi possível observar foi que as temperaturas médias em janeiro e fevereiro no ano de 2014, para a cidade de Curitiba, foram 12% e 4% maiores, respectivamente, comparadas com as temperaturas médias destes meses nos dois últimos anos. Nesse mesmo período, a irradiação apresentou um aumento de 14,3% em janeiro e 5,8% em fevereiro (INMET, 2014).

O desconforto térmico devido a estas altas temperaturas causou um maior uso de equipamentos de ar-condicionado, fazendo com que a demanda de energia elétrica

aumente. O consumo de eletricidade teve o maior aumento, em relação a 2013, na região sul, sendo equivalente a 13,3 % e 16,6 %, para a classe residencial e comercial, respectivamente. Essas classes são representadas quase na sua totalidade por edificações, cuja representatividade maior de consumo de energia elétrica está no equipamento de ar-condicionado (EPE, 2014).

Este artigo utilizou os dados de geração fotovoltaica do EV da UTFPR, além da irradiação incidente no plano do painel fotovoltaico presente no EV, que foram comparados a curva de demanda máxima do SIN, tendo por objetivo mostrar que a geração fotovoltaica está associada à redução dos picos de demanda diurnos típicos de verão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Energia solar fotovoltaica

Na Terra, recebemos só duas milionésimas partes da energia gerada pelo sol. Esta energia por unidade de área e tempo chama-se de constante solar, que, segundo medições recentes, tem um valor de 1367 W/m² antes de atravessar a atmosfera. Após atravessar a atmosfera, a irradiância recebida em um ponto determinado é a soma da radiação direta e a radiação difusa⁵, e é aproximadamente de 1000 W/m² (FUNDACIÓN TERRA, 2000).

A irradiância recebida por uma célula fotovoltaica pode ser convertida em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Um arranjo de células em serie e paralelo constitui um módulo fotovoltaico, que gerará corrente elétrica diretamente proporcional à irradiância recebida.

2.1.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR)

Este tipo de sistema é utilizado nas urbanizações onde a rede elétrica é acessível. Nestes sistemas não existe armazenamento de energia, mas existe uma troca da energia gerada pelo módulo fotovoltaico com a rede elétrica, conforme a Figura 1. Assim, no caso em que a energia gerada for maior do que a consumida, esta pode ser injetada na rede elétrica da concessionária, sendo contabilizada para o consumidor na forma de crédito de energia a ser compensado nas próximas faturas de energia elétrica, tendo validade de 36 meses. No caso em que a energia gerada for menor do que a consumida, a carga consumiria energia da rede elétrica.

⁵ Radiação difusa: Chama-se à radiação que está condicionada pela nebulosidade ou outras condições atmosféricas.



Figura 1 - Configuração de um SFVCR

Um SFVCR possui um inversor inteligente que é capaz de se sincronizar automaticamente com a rede elétrica, não permitindo a entrega de energia à rede caso haja algum problema que ocasione interrupção no fornecimento de energia.

2.2 Legislação

No ano 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa Nº 482/2012 que incentiva o uso de SFVCR. Esta lei permite aos pequenos consumidores instalar geradores fotovoltaicos de pequeno porte em suas unidades consumidoras e utilizar o sistema elétrico da concessionária para injetar o excedente de energia. O excedente de energia será convertido em crédito de energia válido por 36 meses e poderão ser utilizados para abater o consumo da própria unidade nos meses seguintes, ou de outra unidade do mesmo titular. A classificação da central geradora será feita segundo a potência instalada:

- Microgeração: Menor ou igual a 100 kW
- Minigeração: Superior a 100 kW e menor ou igual a 1000 kW

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL) publicou no seu site as condições que devem cumprir os usuários interessados em participar do sistema de compensação de energia elétrica. Algumas destas condições são que o usuário esteja conectado à rede da COPEL, que a potência instalada da geração seja no máximo equivalente a carga instalada, que o inversor utilizado esteja dentro de uma lista proposta pela entidade e que o SFVCR possua licença ambiental (COPEL, 2014).

2.3 Geração distribuída

A geração distribuída é uma forma de geração descentralizada, ou seja, que não conta com um gerador centralizado, mas conta com geradores menores localizados perto da fonte de consumo de energia elétrica (RESOURCE DYNAMIC CORPORATION, 2005). A geração distribuída utilizando SFVCR é útil para reduzir os picos de consumo de energia elétrica e satisfazer a demanda em subestações e edificações (ANNAN, et al,

1991). Além disto, comparada com a geração centralizada, reduz os custos de investimento, pois o investimento da geração distribuída é menor com uma periodicidade maior (HOFF E., et al, 1996). A Figura 2 apresenta a metodologia operacional da geração distribuída, mostrando os custos de expansão evitados, como geração e transmissão (REDE INTELIGENTE, 2011).

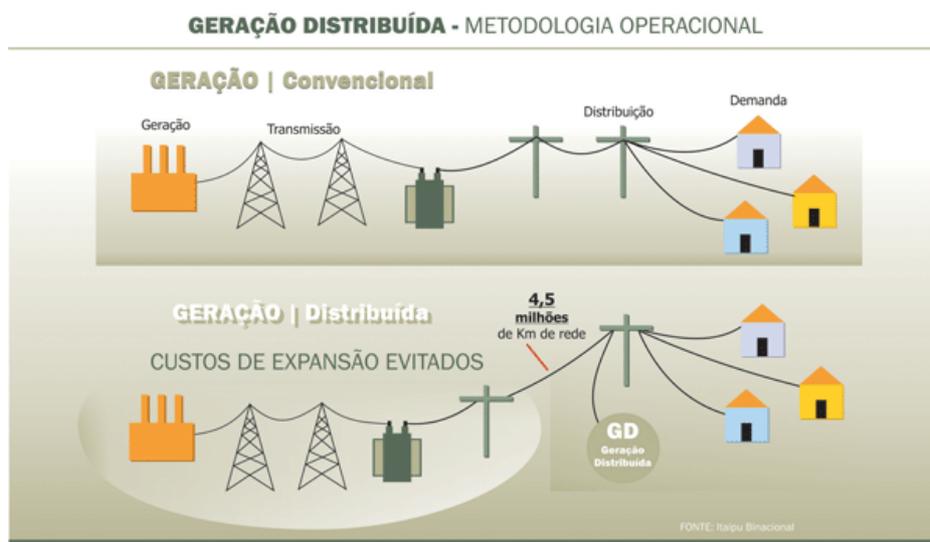


Figura 2 – Metodologia operacional da geração distribuída

3. MATERIAL E MÉTODOS

O método utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi o método hipotético-dedutivo que, segundo Bunge, está conformado pela colocação do problema, a construção de um modelo teórico, dedução de consequências particulares, teste das hipóteses e adição ou introdução das conclusões na teoria (LAKATOS, MARCONI, 2003). O problema definido neste artigo é o aumento do consumo de energia elétrica no verão de 2014, causando picos de consumo de energia elétrica não habituais. A variável pertinente para a construção do modelo teórico foi a temperatura, pois foi mais alta no ano de 2014 comparada com anos anteriores, permitindo deduzir que está diretamente relacionada ao alto consumo de energia elétrica devido à necessidade das pessoas de sentirem conforto térmico. A hipótese neste artigo é que o pico de consumo de energia elétrica demandada durante o verão coincidiu com os picos de irradiação e geração fotovoltaica do EV nesse mesmo período. Para testar esta hipótese foram coletados os seguintes dados para os anos 2012, 2013 e 2014:

- Irradiação solar diária média mensal no plano horizontal fornecida pelo INMET. A partir destes dados foram calculados os dados de irradiação solar diária média mensal no plano com a mesma inclinação do painel instalado no EV (15°)
- Geração fotovoltaica mensal do EV
- Demanda máxima mensal do SIN

Depois de coletar os dados, estes foram comparados para inferir a conclusão da pesquisa, e, finalmente sugerir a potência pico que deveria ter um painel fotovoltaico para suprir o consumo de energia elétrica de um equipamento de ar-condicionado para uma residência padrão popular.

3.1 Procedimentos relacionados ao cálculo do consumo energético do ar-condicionado

O procedimento de cálculo para estimar a capacidade de refrigeração do equipamento de ar-condicionado, consistiu em considerar 600 BTU/h para cada m², e adicionar 600 BTU/h para cada pessoa que frequenta o ambiente, bem como para a quantidade de equipamentos eletroeletrônicos presente no ambiente. A Equação 1 ilustra o cálculo da capacidade de refrigeração (WEB AR-CONDICIONADO, 2014).

$$CR = 600S + 600B + 600C \quad (1)$$

onde, CR= Capacidade de refrigeração, BTU/h;

S= Área do ambiente a ser refrigerado, m²;

B= Número de pessoas que frequenta o ambiente decrescido de uma unidade;

C= Número de equipamentos eletroeletrônicos no ambiente.

Para obter a potência elétrica nominal do equipamento de ar-condicionado deve-se utilizar a Equação 2.

$$P_n = 0,02933CR \quad (2)$$

onde, P_n= Potência elétrica nominal do equipamento de ar-condicionado, W.

Por fim, aplica-se a Equação 3 para calcular a potência elétrica consumida pelo equipamento de ar-condicionado.

$$P = \frac{P_n}{ee} \quad (3)$$

onde, P= Potência elétrica consumida pelo equipamento de ar-condicionado, W;
ee= Eficiência energética do equipamento de ar-condicionado, W/W.

Os equipamentos de ar-condicionado consultados constam na tabela do Procel, sendo escolhido o modelo de unidade interna ASNQ092B4A0 (PROCEL, 2013). A quantidade de pessoas que frequentam o ambiente foi considerada igual a quatro. Como a primeira pessoa não é considerada, o valor do parâmetro B é igual a três, e a quantidade de equipamentos eletroeletrônicos foi considerada igual a dois, portanto o parâmetro C é igual a dois. Dessa forma, obteve-se a potência elétrica consumida pelo equipamento, e o respectivo consumo de energia ao mês, considerando-se uma utilização de oito horas diárias.

Este trabalho adotou como base para calcular a capacidade de refrigeração e o respectivo consumo de energia elétrica do ar-condicionado, a sala de uma residência com 42 m², possuindo essa sala a área de 10 m² (CAIXA, 2007).

3.2 Procedimentos relacionados ao cálculo da potência fotovoltaica pico necessária para suprir o consumo do ar-condicionado

O cálculo para obtenção da potência fotovoltaica de pico para atender este consumo mensal é efetuado a partir da Equação 4 (URBANETZ JUNIOR, 2012).

$$P_{FV} = \frac{E.G}{H_{TOT}.PR} \quad (4)$$

P_{FV} : potência fotovoltaica de pico instalada (Wp);

E: energia demandada pelas cargas diariamente (Wh/dia);

G: irradiância nas condições Standard Test Conditions (STC) (1.000 W/m²);

H_{TOT} : irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos (Wh/m².dia);

PR: taxa de desempenho ou rendimento global do sistema, valor adotado: 0,70.

4. RESULTADOS

A Figura 3 ilustra a geração fotovoltaica do SFVCR presente no EV, podendo constatar que para o ano de 2014 essa geração obteve um pico no mês de fevereiro, e que foi superior ao pico obtido nos anos de 2012 e 2013, que ocorreram em janeiro e dezembro, respectivamente (URBANETZ JUNIOR, 2014).

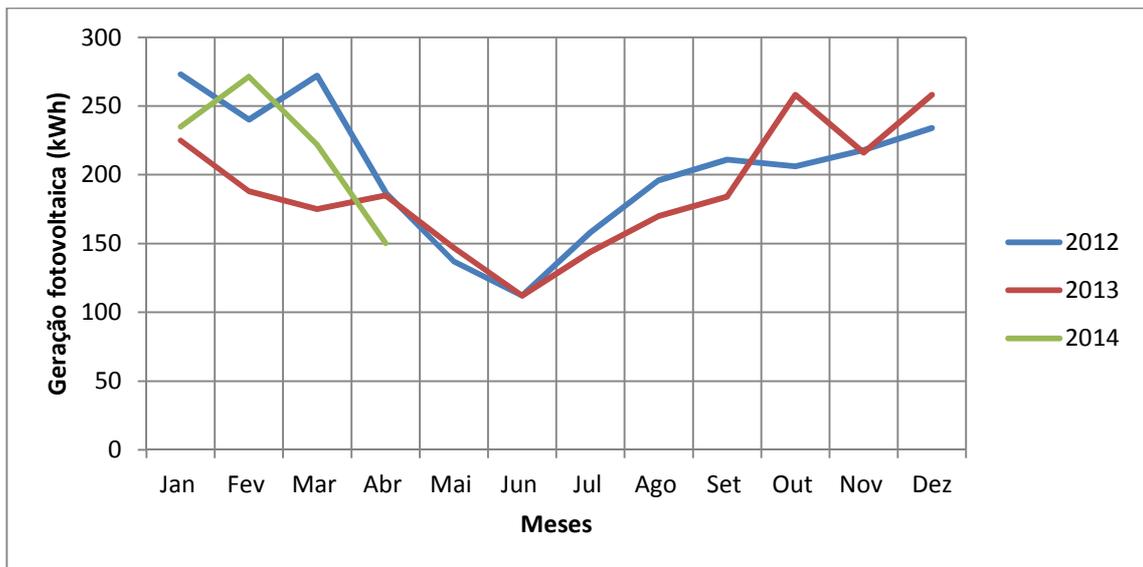


Figura 3 – Geração fotovoltaica mensal no SFVCR do EV

Nota-se que o perfil de irradiação diária média mensal para o plano inclinado do SFVCR do EV, mostrado na Figura 4, apresentou um valor máximo em janeiro de 2014, mantendo-se elevado em fevereiro. O pico atingido em janeiro ultrapassou os valores máximos atingidos nos dois últimos anos, que ocorreram em novembro e dezembro, para 2012 e 2013, respectivamente (Adaptado INMET, 2014).

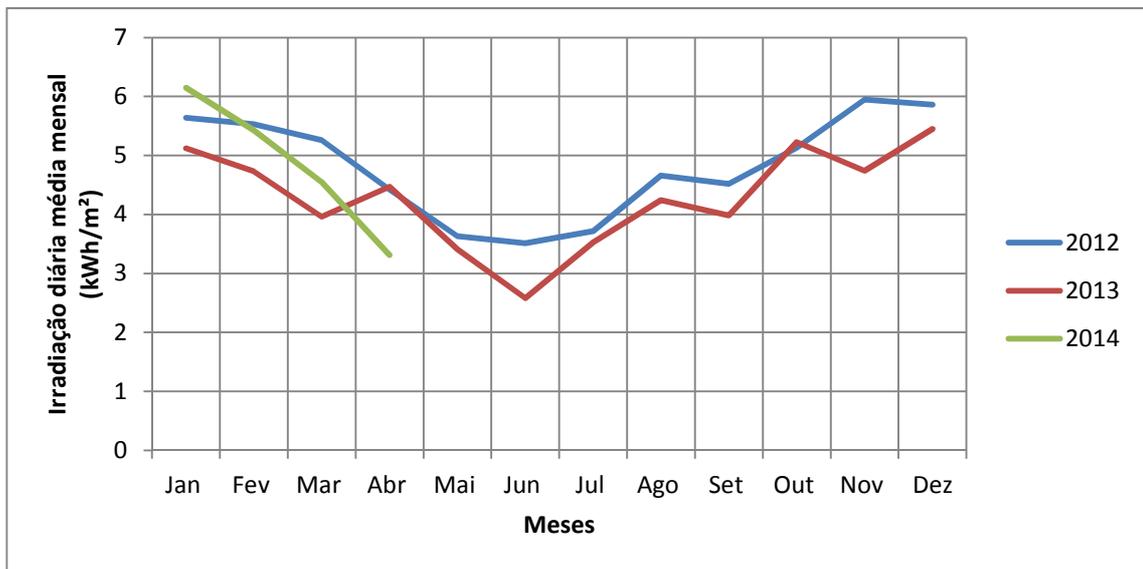


Figura 4 – Irradiação diária média mensal no plano inclinado do SFVCR do EV

Ao observar a Figura 5 nota-se que o pico de demanda no SIN correspondeu ao mês de fevereiro em 2012 e 2014, ao passo que em 2013 ocorreu em dezembro (ONS, 2014).

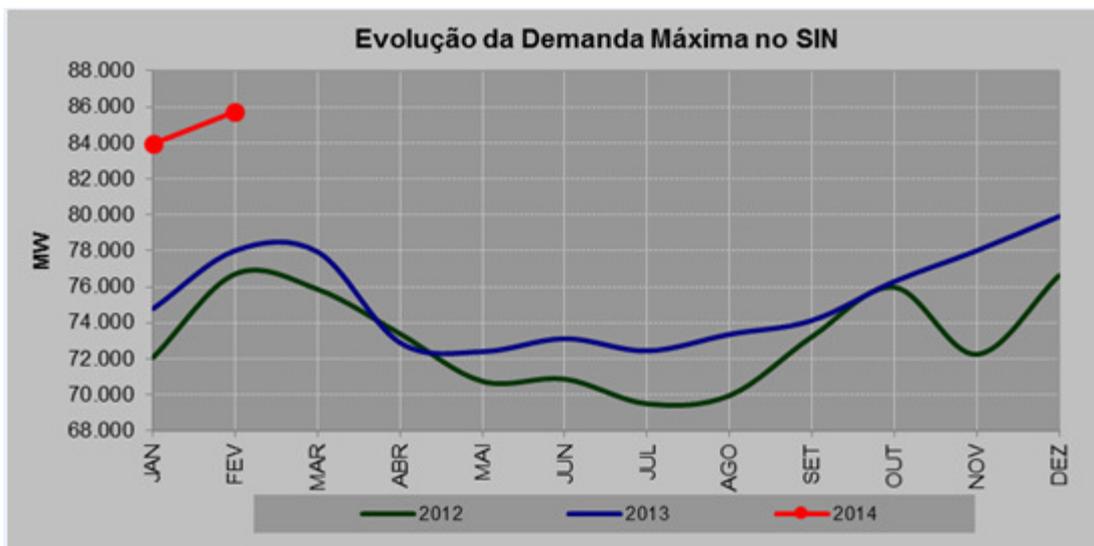


Figura 5 – Perfil da demanda máxima do SIN

Para conhecer a potência fotovoltaica necessária para suprir o equipamento de ar-condicionado foi calculado o consumo de energia elétrica deste, conforme o método apresentado no capítulo 3.1, obtendo que um equipamento de ar-condicionado com capacidade de refrigeração equivalente a 9.000 BTU/h consegue refrigerar um dos cômodos da residência proposta. Considerando o período de utilização deste equipamento como sendo diurno e com duração de oito horas, o consumo de energia será de 186,33 kWh por mês. Portanto, a potência fotovoltaica necessária para suprir o equipamento de ar-condicionado, segundo o método apresentado no capítulo 3.2 é equivalente a 1,95 kWp, para um SFVCR instalado em Curitiba.

5. DISCUSSÃO

Com base na observação e comparação entre as curvas, obtidas em 2012, 2013 e 2014, referentes à geração fotovoltaica mensal e irradiação diária média mensal (URBANETZ JUNIOR, et. al, 2014) e a demanda máxima do SIN (ONS, 2014), pode-se constatar a coincidência temporal entre os picos existentes nas três curvas em 2013, ao passo que em 2014 houve coincidência temporal entre os picos das curvas de geração fotovoltaica e demanda máxima do SIN. Em 2012 a demanda máxima anual, que foi atingida em fevereiro, esteve associada a segunda maior taxa de geração fotovoltaica daquele ano. Em específico para o ano de 2014, o alto valor de geração fotovoltaica do SFVCR do EV ocorrido em fevereiro, associado ao alto valor de irradiação atingido nesse mês, coincidiu com o pico de demanda, às 14:29 do dia 06 de fevereiro que foi de 17.971 MW (ONS, 2014), atingido no SIN da região sul. Dessa forma, essa geração fotovoltaica pode contribuir com a redução dos picos de demanda no sistema elétrico, uma vez que estes instantes coincidem com os maiores potenciais fotovoltaicos, que estão

relacionados a altas taxas de irradiação que maximizam a geração de energia do painel fotovoltaico. Assim sendo, DANG et al (2011), mostram que a implantação de geração distribuída, como a energia solar fotovoltaica integrada nas coberturas de edificações, pode contribuir com a elevação da eficiência energética pois reduz as perdas nas linhas de transmissão e redes de distribuição, reduz o pico de demanda, além de aumentar a confiabilidade no suprimento de energia.

6. CONCLUSÃO

A partir da observação das Figuras 3, 4 e 5, nota-se que os picos de demanda do SIN, ocasionados em boa parte pela utilização de condicionadores de ar, coincidem com o período de maior potencial fotovoltaico, que se situa entre os meses de novembro e março, período em que se encontram as maiores taxas de geração fotovoltaica mensal e irradiação diária média mensal. Portanto, a geração fotovoltaica pode reduzir esses picos de demanda, confirmando a hipótese levantada neste estudo.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio recebido para o desenvolvimento desta pesquisa.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, RANNELS, CABRAAL, Integration of Photovoltaics into Electric Utilities: Issues and Approaches. 10Th European photovoltaic Solar Energy Conference, Lisboa, 1991.

ANEEL: **Banco de Informações de Geração. Capacidade de geração do Brasil.** Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 02 mar. 2014.

CAIXA: GIDUR/VT. Cadernos CAIXA Projeto padrão – casas populares 42 m². Disponível em: <http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/banco_projetos/projetos_his/casa_42m2.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2014.

COPEL. Micro e Minigeração – Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagco>

pel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656>. Acesso em 15 mar. 2014.

DANG, K., YU, J., DANG, T., HAN, B., “*Benefit of Distributed Generation on Line Loss Reduction*”. IEEEEXPLORE: 2011.

EPE. Resenha mensal do mercado de energia elétrica. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Resenha%20Mensal%20-%20Fevereiro%202014.pdf>>. Acesso em 22 mar. 2014.

FUNDACIÓN TERRA, Energía fotovoltaica, Perspectiva ambiental, Barcelona-Espanha, 2000, v.16.

HOFF E., Thomas; WENGER J., Howard; FARMER K., Brian, Distributed generation - An alternative to electric utility investments in system capacity. Energy Policy. Vol 24. No 2. P 137-147. 1996.

INMET. Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em 04 mar. 2014.

LAKATOS, MARCONI, Fundamentos de metodologia científica, 5. Ed., São Paulo: ATLAS 2003, p. 98-99.

ONS. Boletim semanal da operação: Evolução da Demanda Máxima no Sistema Interligado Nacional. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_semanal/index.htm>. Acesso em 25 mar. 2014.

PROCEL. Condicionadores de ar tipo Split Hi-Wall. Disponível em: <<http://static.webarcondicionado.com.br/blog/uploads/2013/11/tabela-procel-Hi-Wall-novembro-2013.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2014.

REDE INTELIGENTE, Aneel quer reduzir barreiras para geração distribuída de pequeno porte. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2011/02/01/aneel-quer-reduzir-barreiras-para-geracao-distribuida-de-pequeno-porte/>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

RESOURCE DYNAMIC CORPORATION, Distributed Generation, Disponível em: <<http://www.distributed-generation.com/>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

URBANETZ JUNIOR, J. Energia solar fotovoltaica: fundamentos e dimensionamento de sistemas. Anexo 1: Método prático para dimensionamento de sistemas FV isolados e Anexo 2: Método prático para dimensionamento de sistemas FV conectados à rede elétrica. Curitiba, 2012.

URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JR, E.; MÁXIMO TIEPOLO, G.. Análise do desempenho de dois anos de operação do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica

do Escritório Verde da UTFPR. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 31 a 03 de abril de 2014.

WEB AR-CONDICIONADO. Cálculo de BTU. Disponível em:
<<http://www.webarcondicionado.com.br/calculo-de-btu>>. Acesso em: 03 mar. 2014.