

ANÁLISE DA DIFUSÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO BRASIL: PREVISÕES E REALIDADE.

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

Conrado Augustus de Melo – conrado@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Resumo. A recente criação da Resolução Normativa nº 482 pela ANEEL permitiu que consumidores de energia elétrica passassem a atuar como micro e mini geradores distribuídos. A partir daí alguns sistemas fotovoltaicos conectados a rede foram instalados e atualmente o país conta com um pequeno mercado, aproximadamente 700 sistemas que totalizam cerca de 3 MW de geradores de energia elétrica via fonte solar. Entretanto, a difusão desses sistemas no país tem se mostrado lenta. Neste artigo dois modelos de previsão da difusão (modelo de Fisher-Pry e modelo de Bass) foram aplicados para avaliação do comportamento da difusão de geradores residenciais de energia solar fotovoltaica. Os dados utilizados foram coletados e disponibilizados no “Registro de Micro e Minigeradores distribuídos” do Banco de Informações de Geração da ANEEL. O ajuste dos modelos aos dados resultaram em parâmetros t_h , t_s , q e p iguais a 85,53, 33,51, $3,62 \times 10^{-4}$ e 0,12 respectivamente. Os resultados foram capazes de evidenciar, de maneira empírica, que a difusão tem sido lenta, sugerindo assim que outros mecanismos de incentivo à energia solar são necessários para acelerar a difusão dos sistemas fotovoltaicos no Brasil. Apesar de algumas limitações, como alguns erros presentes na base de dados e a inviabilidade da desagregação dos dados em níveis regionais ou por zona de concessão, os resultados apresentaram bons ajustes em termos estatísticos.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Difusão, Energia fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

Desde abril de 2012, com a criação da Resolução Normativa nº 482 (RN 482) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é possível que consumidores de energia elétrica instalem em suas residências, comércios e indústrias sistemas de geração conectados à rede para consumo próprio. Nela ficou estabelecido o conceito de micro e mini geração distribuída (GD), onde a primeira teria limite superior de 100 kW e a segunda iria de 100 kW até 1 MW instalados. Dentre as alternativas energéticas contempladas, a solar fotovoltaica estava incluída. A partir daí, estava regulamentada a utilização de sistemas fotovoltaicos e a geração distribuída no Brasil.

Entretanto, o crescimento da geração distribuída via sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) no país ainda é tímido. Já com mais de três anos de regulamentação, o Brasil conta hoje (outubro/2015) com cerca de 700 sistemas instalados em todo o território totalizando pouco mais de 3 MWp. Comparando com o crescimento em outros países, na Alemanha, por exemplo, em 1.991 deu-se início ao Programa 1.000 Telhados, que no fim de 1.993 já havia resultado em cerca de 2.200 sistemas instalados que totalizavam em torno de 5,3 MWp (Salamoni, 2009). Além disso, naquela época, o custo dos equipamentos necessários para um sistema fotovoltaico era mais elevado (Parente, Goldemberg e Zilles, 2002). Como se observa nas Figs. 1 e 2, o crescimento de SFCR no Brasil ainda não é elevado e necessita de uma melhoria nos mecanismos regulatórios e de incentivo para que o potencial da fonte seja devidamente aproveitado no país.

A inserção da geração distribuída é uma mudança de paradigma no setor elétrico. Inicialmente projetado e regulamentado para operar num fluxo de energia único, indo dos geradores aos consumidores, com a GD os consumidores passam a atuar também como geradores e esse comportamento gera impactos no setor, tanto de ordem de mercado quanto de ordem técnica. De ordem de mercado, com altas taxas de inserção da GD, as concessionárias de energia teriam redução no orçamento e consequente aumento no preço da energia dos não usuários de geração distribuída (Kind, 2013). De ordem técnica, pode-se citar impactos na geração das usinas e impactos na subrede local de distribuição. No primeiro, cita-se, como exemplos, a necessidade de se realizar adaptações na operação de usinas convencionais, aumento da capacidade de armazenamento de energia, flexibilização das usinas, dentre outros (Milligan *et al.*, 2011). No segundo, correspondente aos impactos na subrede de distribuição, cita-se as mudanças de perfis de tensão, a inserção de harmônicos, riscos de ilhamento etc (Eltawil, Zhao, 2010).

Dentre os benefícios adquiridos com a difusão da geração distribuída, Height (2000) cita a redução dos gastos com a transmissão da energia, a redução de emissão de gases do efeito estufa, criação de empregos e aumento na qualidade da energia.

Portanto, prever o crescimento dos SFCR é uma ferramenta importante ao planejamento energético capaz de orientar na tomada de decisões, antever problemas e com isso otimizar o novo sistema elétrico e as alocações de recursos no futuro.

Dessa forma, o artigo tem como objetivo ajustar os dados da breve experiência nacional de crescimento do número de usuários aos modelos de difusão de tecnologias já utilizados em alguns trabalhos e comparar os parâmetros do ajuste aos estipulados pelos autores. A partir desse resultado, é possível chegar a conclusões a respeito da efetividade da política nacional de inserção da fonte solar fotovoltaica e da evolução que a tecnologia tem obtido no país.

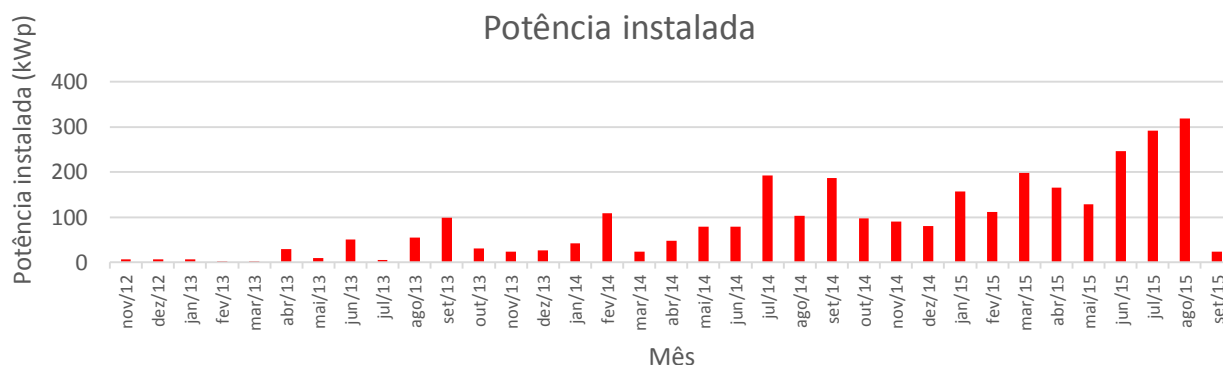


Figura 1- Potência instalada mensalmente desde a criação da RN 482. Fonte: (BIG/ANEEL, 2015)

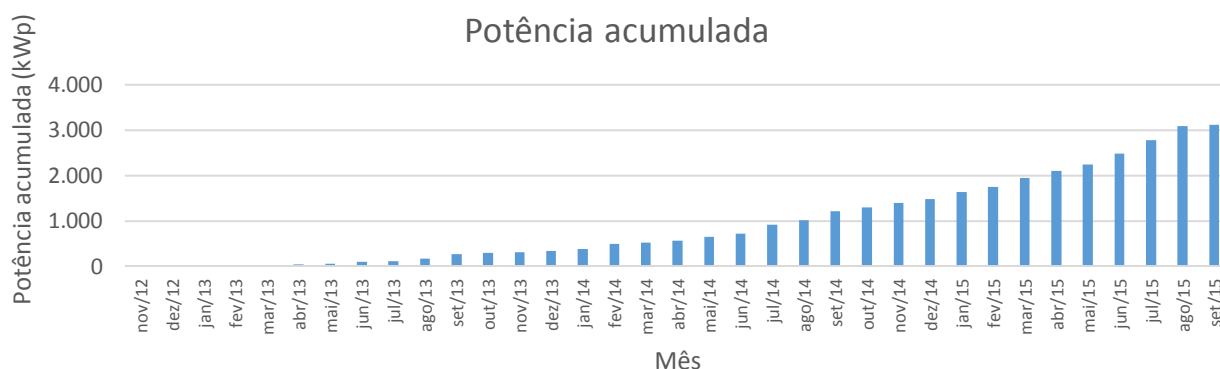


Figura 2- Evolução da potência acumulada desde a criação da RN 482. Fonte: (BIG/ANEEL, 2015)

O artigo está dividido ao todo em 5 seções. Na Seção 2 está apresentada uma revisão da literatura sobre o tema. Na Seção 3 está apresentada a metodologia de análise e na 4 os resultados obtidos junto a uma discussão dos resultados. Por fim na Seção 5 são apresentadas as conclusões feitas com a análise.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns trabalhos já estudaram a projeção do crescimento da fonte solar fotovoltaica no Brasil. Jannuzzi e Melo (2013) realizaram um estudo prospectivo para o ano de 2030 do tamanho do mercado potencial de consumidores residenciais que adotariam SFCR. Consideraram para o estudo dois cenários de projeção. O primeiro, chamado de “baseline”, parte do pressuposto de mantimento da política de *net metering* até o fim do período. No segundo, chamado no trabalho de “induzido”, parte do pressuposto de um crescimento de mercado influenciado pela existência de *feed-in tariffs* e subsídios financeiros diretos.

Os autores consideraram para o primeiro cenário que as zonas de concessão das regiões nordeste, centro oeste e sudeste com tarifa acima de 0,33 US\$/kWh já teriam atingido a paridade tarifária e, portanto, seria vantajoso para o consumidor adquirir o sistema. Assim, um mercado total de aproximadamente 3,8 milhões de residências foi estimado para essas regiões no ano de 2010.

No segundo cenário, os autores consideraram a utilização de mecanismos de *feed-in tariffs* e subsídios financeiros diretos nas mesmas três regiões. Entretanto, foi incluído agora as zonas de concessão em que a tarifa fica entre 0,29 e 0,32 US\$/kWh, que seriam aquelas que, com a adoção dos mecanismos de incentivo, passariam a oferecer vantagens ao consumidor com a aquisição de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Neste caso, o mercado potencial obteve um acréscimo de pouco mais de 1,2 milhões de residências, totalizando aproximadamente 5 milhões também para o ano de 2010.

Na modelagem matemática da difusão da tecnologia, o potencial de penetração do mercado foi estimado utilizando uma abordagem de função logit baseada numa solução especial do modelo de Fisher-Pry. A equação que descreve o modelo é dada conforme a Eq. (1)

$$M(t) = \frac{k}{1 + e^{-\left(\frac{\ln(81)}{t_s}\right)(t-t_h)}} \quad (1)$$

Onde k é a penetração potencial total de mercado (em percentual), t é o tempo, t_h é o tempo em que metade do mercado é penetrado e t_s é o tempo necessário para ocorrer uma transição de 10% para 90% da penetração total. Para a simulação, os autores utilizaram uma penetração máxima, k , de 10%, t_h de 8 anos e t_s de 6 anos.

Konzen (2014) também apresenta uma modelagem prospectiva do crescimento dos SFCR nas residências brasileiras. Também utilizando das teorias de difusão de tecnologias, o autor elaborou 6 cenários (I – *business as usual*, II – desconto no Imposto de Renda, III – isenção fiscal dos módulos, IV – sem tributação da compensação, V – *virtual net metering* e VI – uma combinação dos cenários III, IV e V).

Dessa vez, o autor utilizou uma outra abordagem de difusão, o modelo de Bass. Basicamente, o modelo é equacionado conforme a Eq. (2).

$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} = p + \frac{q}{m}N(t) \quad (2)$$

Onde $f(t)$ é a probabilidade de adoção no tempo t , $F(t)$ é a distribuição acumulada, p é o coeficiente de inovação, que representa uma influência externa ao processo de difusão, q é coeficiente de imitação, uma influência interna ao processo de difusão, m é o mercado potencial final e $N(t)$ é o número acumulado de adotantes, com a igualdade dada conforme a Eq. (3):

$$N(t) = mF(t) \quad (3)$$

Os valores dos parâmetros usados pelo autor foram p igual a 0,0015, q igual a 0,3 e m igual a 4.402 para o ano de 2015. A fórmula da distribuição acumulada, $F(t)$, utilizada pelo autor, é dada conforme a Eq. (4).

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}} \quad (4)$$

É importante ressaltar que em ambos os artigos, os autores tratam o mercado potencial como crescente ano a ano de acordo com o crescimento populacional e a redução do custo dos equipamentos de um sistema fotovoltaico.

Em outro trabalho realizado pela EPE (2014), outra abordagem foi utilizada. Neste, uma modelagem a partir das teorias de difusão de tecnologias também foi realizada e os autores determinaram o potencial técnico, econômico e de mercado para o Brasil. Essa modelagem não será analisada com mais afinco porque no modelo os parâmetros não determinam a forma da curva, visto que ao fator de realização do mercado foi atribuído valores fixos para determinados períodos após atingida a viabilidade de instalação do sistema.

Outro ponto importante de ressaltar é que ambas as modelagens pressupõem uma curva sigmoide de difusão da tecnologia, ou seja, uma curva com a forma de um “s”. Essa curva parte basicamente do princípio de que no início a difusão é feita somente por alguns usuários mais inovadores, que não têm receio de adquirir uma tecnologia nova e pouco conhecida, depois pessoas que tendem a ser menos inovadoras, que compõem a maior parte do mercado, passam a adquirir a tecnologia até que, depois de percorrido um período de maturidade da inovação, essa chega aos mais conservadores, aqueles que têm maior resistência à aquisição de algo novo.

3. METODOLOGIA

Para realizar a análise proposta, utilizou-se os dados fornecidos pela ANEEL do “Registros de Micro e Minigeradores distribuídos” que contém uma relação de todos os usuários de sistemas de geração distribuída. Os dados foram trabalhados para contar somente com os usuários residenciais de SFCR, pois os dois modelos vistos na Seção 2 tratam somente da evolução dos sistemas residenciais. É possível notar no registro alguns erros no cadastro, onde um dos sistemas cadastrados datava do século passado, dentre alguns outros, que não interferiram na contagem do número sistemas e em sua ordenação.

Na Fig. 3 observa-se a evolução do número de usuários residenciais de SFCR. Na linha de cor cinza estão representados o número acumulado de usuários (eixo vertical da esquerda). As barras de cor azul representam a quantidade de sistemas instalados para cada mês (eixo vertical da direita). Ao todo somam-se 32 meses de dados. Entretanto, para o mês de setembro o número de sistemas instalados está consideravelmente diferente da progressão dos meses anteriores, o que indica que os dados de todos os sistemas cadastrados nesse mês não tenham sido atualizados

ainda. Portanto, eliminou-se os dados do mês de setembro e trabalhou-se somente com os dados dos meses de fevereiro de 2013 até agosto de 2015, totalizando 31 meses.

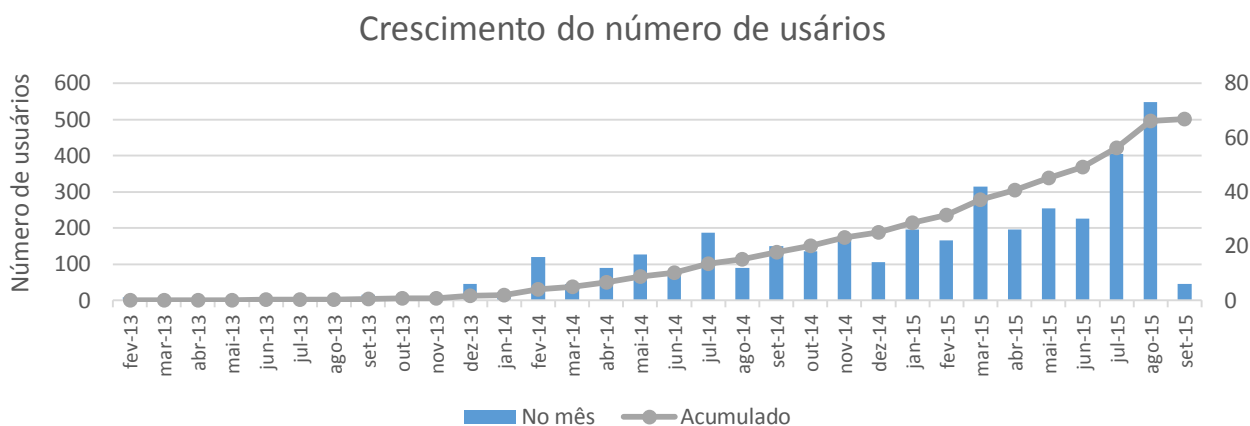


Figura 3 – Crescimento do número de usuários de geração distribuída. Fonte: (ANEEL, 2015)

Nota-se pela análise da curva cinza que ainda não se percebe nesta o formato sigmoideal, como previsto pela teoria de difusão de tecnologias. Isso pode indicar um crescimento lento, que as taxas de inserção da tecnologia no país ainda irão aumentar e o país tem um grande potencial de mercado a ser aproveitado.

Com o auxílio do software R-Projetc (R Core Team, 2015), utilizou-se o pacote **stats** para realizar a regressão não linear via método dos mínimos quadrados.

Para o modelo de Jannuzzi e Conrado (2013), utilizou-se somente os dados das regiões nordeste, centro-oeste e sudeste. Essa alteração reduziu consideravelmente o número de sistemas instalados, o que distancia os dados mais ainda do modelo projetado, indo de aproximadamente 500 sistemas para cerca de 350.

Konzen (2014) gerou um modelo que incluía todos os estados do país. Dessa forma, utilizou-se os sistemas cadastrados de todos os estados para realizar o ajuste.

Com relação aos dados de crescimento do mercado potencial, para o modelo Fisher-Pry, adotou-se o mesmo mecanismo que Jannuzzi e Conrado (2013). Apesar de não haver no artigo valores numéricos exatos da expectativa de crescimento de mercado, considerou-se suficiente uma aproximação feita através do gráfico, supondo a relação linear.

Para o modelo de Bass, o autor utilizou o crescimento populacional previsto para cada região, a partir do ano de 2014, para as faixas aptas a aquisição de SFCR, de modo que as estimativas são mais desagregadas levando em consideração as diferenças regionais e das zonas de concessão de cada distribuidora. No ajuste dos dados ao modelo proposto, não será realizada essa desagregação, pois se não teríamos a grande maioria das áreas de concessão sem dados para validar. Dessa forma, o ajuste será feito em nível nacional, ou seja, será utilizada a soma do mercado potencial e todos os estados presentes no registro da ANEEL. Para o ano de 2013 foi projetado um valor a partir do crescimento anual entre 2014 e 2015. Considerou-se que os valores estimados correspondem ao potencial no mês de dezembro de cada ano. Adotou-se uma taxa de crescimento constante mês a mês para projetar o valor dos meses de janeiro a novembro.

Em ambos os modelos, só se utilizou os valores de crescimento de mercado para o cenário de *net metering*, que corresponde a atual situação em que se encontra o país.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. 1 apresenta os resultados da análise de regressão não linear dos dados aos modelos. Ambos os ajustes tiveram bons resultados em termos estatísticos, sendo todos os valores ajustados significativos a 5%.

Nota-se nos resultados que os parâmetros estimados por Jannuzzi e Conrado (2013) no modelo de Fisher-Pry foram superiores aos medidos. Uma análise puramente matemática do resultado levaria a concluir que o crescimento da fonte no Brasil atingirá parcelas elevadas do mercado potencial em um prazo menor do que haviam estimado. Esse resultado ocorre porque nos dados utilizados para o ajuste, temos que esses 31 meses apresentaram baixa inserção, menos que o previsto pelos autores, sem ainda dar a forma sigmoide à curva ou mesmo poder notar claramente um crescimento semelhante ao exponencial, o que é comum para períodos iniciais nas curvas de difusão. Esse comportamento resulta em valores pequenos de t_s no ajuste, o que provoca uma explosão mais abrupta na forma “s” da curva. Com isso, o valor de t_h no ajuste também é reduzido.

Assim, os valores obtidos expressam parâmetros de uma curva com crescimento baixo no início e uma explosão abrupta em certo momento. Esse resultado não condiz com o esperado. Não é plausível imaginar que o mercado brasileiro passaria de menos de 50 mil usuários para mais de 600 mil em menos de 3 anos (aproximadamente 33,5 meses), como prevê uma extrapolação do modelo para dados futuros.

Tabela 1 – Resultados dos ajustes e valores estimados iniciais. Fonte: Elaboração própria.

	<i>Média</i>	<i>Erro</i>	<i>t-student</i>	<i>p-valor</i>	<i>Estimado</i>
Fisher Pry					
<i>ts</i>	33,51	1,29	26,05	2,00E-16*	72,00
<i>th</i>	85,53	2,22	38,45	2,00E-16*	96,00
Bass					
<i>p</i>	3,62E-04	2,79E-05	12,96	1,37E-13*	1,50E-03
<i>q</i>	0,12	3,78E-03	32,33	2,00E-16*	0,30

* Estatisticamente significativo a 5%

As Figs. 4 e 5 apresentam os gráficos dos valores (pontos) e as curvas estimadas no ajuste (azul e vermelho).

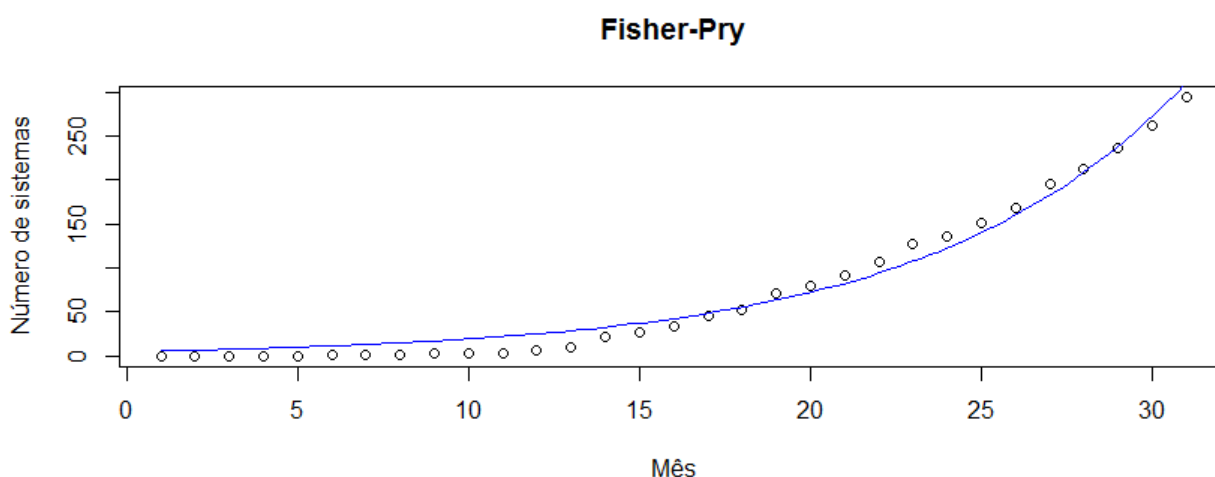


Figura 4 – Evolução dos sistemas instalados e curva de modelo de Fisher-Pry. Fonte: Elaboração Própria

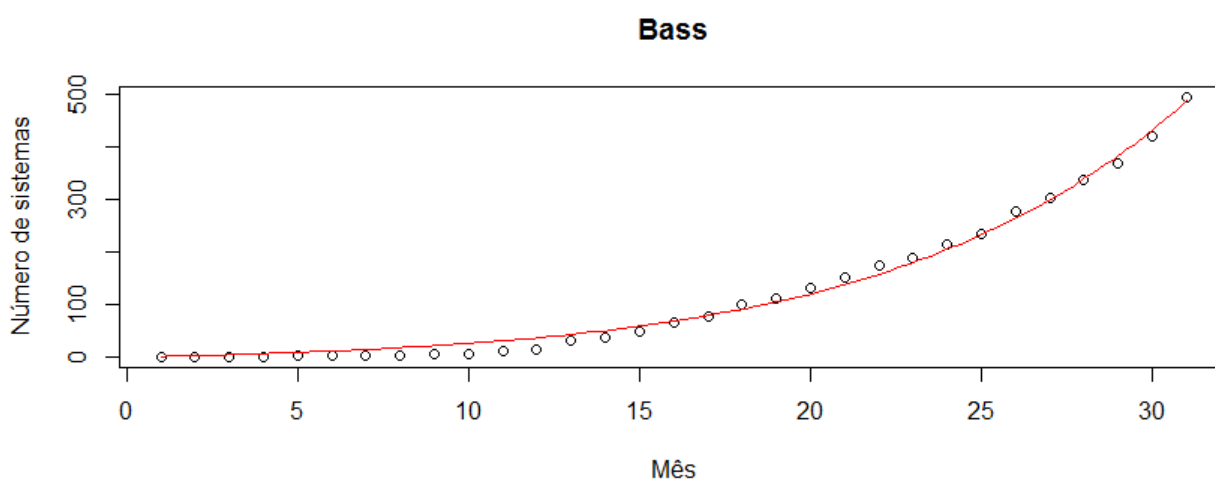


Figura 5 – Evolução dos sistemas instalados e curva de modelo de Bass. Fonte: (Elaboração Própria)

Nos resultados dos parâmetros do modelo de Bass, obteve-se valores menores que o previsto pelo autor. Esses resultados dão menor margem a uma interpretação equivocada puramente matemática. Revelam que o crescimento da fonte fotovoltaica no país é inferior ao esperado. Inclusive, apesar de o autor ter utilizado parâmetros conservadores, segundo ele mesmo, o crescimento nacional tem demonstrado valores ainda menores para a tecnologia do país. Segundo Jeuland (1995), o parâmetro q raramente é menor que 0,3, o que indicaria um coeficiente de imitação muito baixo.

Além dessa baixa inserção inicial, a extrapolação das curvas de ambos os modelos mostra uma saturação do mercado em curto prazo, passando este, após certo período, a crescer lentamente, apenas acompanhando o crescimento populacional da faixa de usuários em potencial.

5. CONCLUSÕES

A difusão de sistemas fotovoltaico no Brasil tem apresentado valores baixos, de fato, como mostrado empiricamente, tem sido incipiente quando comparada a outras previsões e a experiência de outros países. As previsões feitas por Jannuzzi e Melo (2013) e Konzen (2014), que assumiram hipóteses conservadoras, na verdade superestimaram o mercado nacional, ao menos no período inicial de avaliação. Esse resultado evidencia a baixa eficiência das condições existentes no cenário brasileiro para promoção da difusão dos SFGR.

A atual política de *net metering*, criada a partir da Resolução Normativa nº 482, representou um marco na inserção de tecnologias para geração distribuída brasileira. Entretanto, somente essa regulamentação não é capaz de promover um crescimento expressivo da energia solar no país. Dessa forma, verifica-se a necessidade de implementação no Brasil de outros mecanismos capazes de aumentar o mercado potencial dessa tecnologia, como a redução dos impostos dos equipamentos, isenção de ICMS sobre a energia gerada, criação de meios de financiamento do sistema, regulação de *net metering virtual*, dentre outras alternativas. Com o trabalho, essa ineficiência ficou evidenciada de maneira empírica.

Algumas limitações do método utilizado devem ser consideradas, como os erros no banco de dados da ANEEL, e a não desagregação do ajuste para o modelo de Bass, assim como o curto período da análise. Entretanto, a baixa disponibilidade de dados impede que uma análise mais detalhada por região, ou até mesmo por zona de concessão seja realizada.

Com o ganho de experiência do país na difusão da fonte, o fortalecimento de toda cadeia de mercado nacional e a inclusão de novos mecanismos de incentivo, o país pode acelerar o aproveitamento de seu potencial solar tanto em termos de potência instalada, devido à sua população elevada, quanto em termos energéticos, devido à alta incidência de radiação em todo o território.

Para conhecer melhor o mercado brasileiro de sistemas fotovoltaicos e contribuir com a literatura da tecnologia, é importante que essa análise seja refeita à medida que se aumente a disponibilidade de dados. Portanto, fica como sugestão de trabalhos futuros a atualização dos resultados obtidos neste artigo.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2015, Registro de Micro e Minigeradores distribuídos, Banco de Informações de Geração.
- Empresa de Pesquisa Energética, 2014, Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Nota técnica DEA 19/14. Rio de Janeiro.
- Eltawil, M. A., Zhao, Z., 2010. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n. 1, p. 112-129.
- Jannuzzi, G. M., Melo, C. A., 2013, Grid-connected photovoltaics in Brazil: Policies and potential impacts for 2030, *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, n. 1, p. 40-46.
- Jeuland, A. P., 1995, The Bass Model a Tool to Uncover Empirical Generalizations in Diffusion of Innovations, *Empirical Generalizations Conference*, University of Chicago.
- Kind, P., 2013. *Disruptive Challenges: Financial Implications and Strategic Responses to a Changing Retail Electric Business*. Edison Electric Institute.
- Salamoni, T. I., 2009, Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica, Tese de Doutorado, PPGEC, UFSC, Florianópolis.
- Konzen, G., 2014, Difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil: uma simulação via modelo de Bass, Dissertação de mestrado, IEA, USP, São Paulo.
- Lange, W., 2012, Metodologia de mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento energético fotovoltaico. Empresa de Pesquisa Energética/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
- Milligan M., Ela, E., Hodge, B. Kirby, B., Lew, D., Clark, C., DeCesaro, J., Lynn, K., 2011. Integration of Variable Generation, Cost-Causation, and Integration Costs. *The Electricity Journal*, vol. 24, n. 9, p. 51-63
- Height, M., J., 2000, *Distributed Electricity Generation*, Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Parente, V., Goldemberg, J. e Zilles, R., 2002. Comments on Experience Curves for PV Modules, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 10, n. 8, p. 571–74.
- R Core Team, 2015, R, A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

ANALYSIS OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION IN BRASIL: PREDICTIONS AND REALITY.

Abstract. *The recent creation of the Normative Resolution n° 482 by ANEEL allowed electrical energy consumers to operate as distributed micro and mini generators. After that, a few grid tied photovoltaic systems were installed and the country has as small market, approximately 700 systems totaling around 3 MW of electrical energy generatos trough solar source. However, those systems diffusion across the country has been shown slow. In this article two diffusion prediction models (Fisher-Pry and Bass) were used to evaluate the diffusion behavior of photovoltaic residential generators. The data used were collected and available in ANEEL's Generation Information Bank's "Registro de Micro e Minigeradores". The models fit to the data resulted in parameters t_h , t_s , q e p equal to 85,53, 33,51, $3,62 \times 10^{-4}$ e 0,12 respectively. The results were capable to point empirically that the diffusion has been slow, suggesting other solar energy incentive mechanisms are necessary to accelerate photovoltaic diffusion in Brazil. Despite some limitations, like errors in database and impossibility of its disaggregation in regional level or concession area, the results presented a good fit.*

Key words: *Distributed Generation, Diffusion, Photovoltaic Energy.*