

AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ENERGÉTICA DE UNIDADES PROSSUMIDORAS RESIDENCIAIS COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM OPERAÇÃO NO SUL DO BRASIL

L.T. Scarabelot¹, G. A. Rampinelli², C. R. Rambo³.

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - leticia.scarabelot@posgrad.ufsc.br

²Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Energia e Sustentabilidade - giuliano.rampinelli@ufsc.br

³Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica - carlos.rambo@ufsc.br

Recibido 07/08/18, aceptado 19/09/18

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise do sistema de compensação de energia elétrica a partir do monitoramento contínuo de variáveis energéticas e elétricas de sistemas fotovoltaicos integrados em unidades consumidoras residenciais considerando aspectos econômicos e perfis de injeção de energia elétrica na rede de distribuição. As potências nominais dos sistemas fotovoltaicos são de 1,25 kW_p, 2,08 kW_p e 3,71 kW_p. A produtividade anual dos sistemas fotovoltaicos foi de 1272,6 kWh/kW_p, 1299,5 kWh/kW_p e 1246,1 kWh/kW_p enquanto que a energia elétrica que é injetada na rede representa uma fração de 63 %, 65 % e 56 % da energia elétrica gerada, considerando cada sistema deste estudo. A redução no consumo de energia elétrica das unidades prossumidoras foi de 68 %, 95 % e 63 % e o tempo de retorno de investimento foi de aproximadamente 6 anos e 7 meses.

Palavras chave: energia solar, geração distribuída, prossumidor, sistema de compensação.

INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) para geração de energia elétrica vem crescendo rapidamente, influenciada pela redução de preços dos diferentes componentes, maturidade e confiabilidade tecnológica e principalmente a partir da regulamentação, normatização, certificação e incentivos governamentais à energia solar (Breyer et al, 2013; Davi et al, 2016).

No Brasil, o ponto de partida para a regulamentação da micro e minigeração distribuída aconteceu com a publicação da Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (ANEEL, 2012). O sistema de compensação de energia, internacionalmente conhecido como *net metering* (Figura 1), consiste em medir o fluxo de energia elétrica nos dois sentidos em uma unidade consumidora que possui geração, ou seja, é realizada a contabilização entre a energia consumida e a energia exportada ou injetada para a rede, dessa forma o faturamento é dado somente pela energia ativa (Darghouth et al, 2011; Eid et al, 2014). Não há comercialização de energia elétrica se ao final do período de faturamento a energia elétrica injetada for maior que a energia elétrica consumida. Neste caso, a unidade consumidora recebe créditos de energia elétrica. O excedente que não foi utilizado no mês corrente deve ser utilizado para compensação em meses subsequentes.

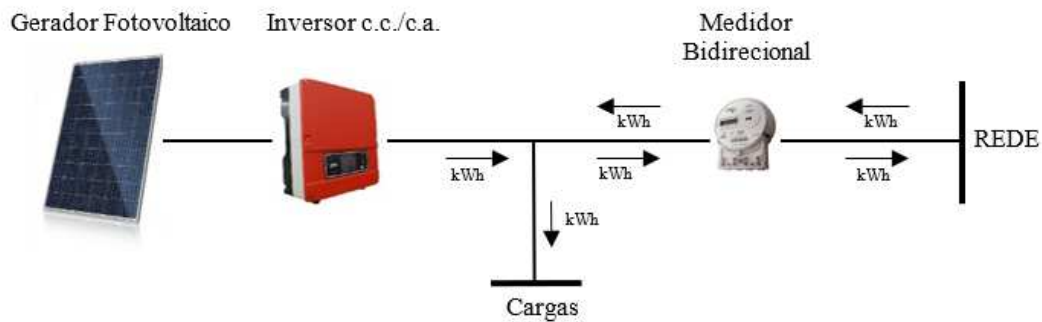


Figura 1: Sistema de compensação net metering (Scarabelot et al, 2018).

A Figura 2, mostra que 79,4 % dos sistemas de geração distribuída estão instalados em unidades consumidoras residenciais (ANEEL, 2017), uma vez que nesta classe se encontram as maiores tarifas de energia elétrica e a maior viabilidade técnica e econômica (Holderman et al, 2014). Devido ao perfil de consumo destas unidades consumidoras, os níveis ou frações de energia elétrica injetada na rede em residências no Brasil são altos (Davi et al., 2016).

Em 2015 houve a publicação da Resolução Normativa nº 687/2015, pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que revisa e atualiza a Resolução Normativa nº 482/2012, definindo novas potências em duas categorias: a microgeração distribuída que contempla sistemas com potência instalada de até 75 kW e a minigeração distribuída caracterizada como uma central geradora de energia elétrica, com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para fonte hídrica). Houve a redução dos prazos para conexão dos sistemas, novas possibilidades como a geração compartilhada e a geração em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, a consolidação do modelo de auto consumo remoto, o melhoramento das informações das faturas, facilitando o entendimento dos clientes geradores de energia e aumentando o público alvo (ANEEL, 2015).

A paridade tarifária, ou seja, a equivalência de custo entre a energia elétrica fornecida pela concessionária de distribuição e a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico da unidade consumidora, ocorreu primeiramente na Europa por volta do ano 2010, especificamente para o mercado residencial na Itália. As principais características para esse marco foi o elevado recurso solar disponível e as altas tarifas de energia elétrica (Breyer & Gerlach, 2013).

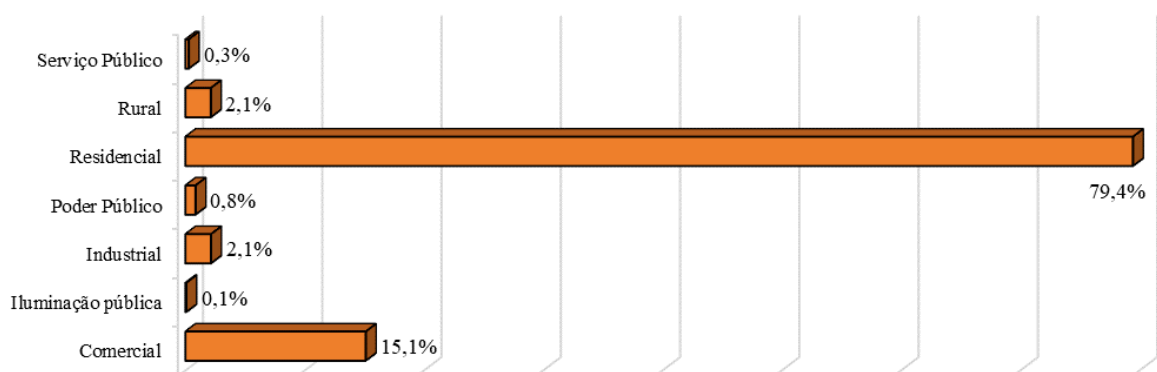


Figura 2: Unidades prossumidoras, por classe de consumo (ANEEL, 2017).

A geração distribuída, é caracterizada por pequenos geradores de energia elétrica conectados à rede de distribuição da concessionária local, sendo assim possível que cada consumidor gere sua própria energia elétrica (Lacchini & Rüther, 2015).

A aplicação dos sistemas fotovoltaicos em unidades consumidoras residenciais implica em várias vantagens econômicas e técnicas, por exemplo, redução dos custos operacionais, adiamento de

atualização das linhas de distribuição, menores perdas por transmissão e distribuição, aumento na qualidade do serviço para o cliente, rápida implementação e modularidade (Islam et al., 2015). Além disso, o setor residencial no Brasil em 2013, correspondia a aproximadamente 26 % do consumo de energia elétrica e teve o maior índice de crescimento. O principal fator no crescimento da demanda de energia elétrica é a popularização de equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos (Villareal & Moreira, 2016).

Este trabalho apresenta uma análise do sistema de compensação de energia elétrica em unidades prosumidoras residenciais no Sul do Brasil. O estudo é realizado a partir do monitoramento de variáveis energéticas e elétricas de sistemas fotovoltaicos integrados em unidades consumidoras residenciais. Para a análise são considerados aspectos econômicos, indicadores de desempenho e características de injeção de energia elétrica na rede de distribuição.

MATERIAIS E MÉTODOS

As principais características dos sistemas fotovoltaicos monitorados e analisados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1. Os sistemas fotovoltaicos estão em operação no Sul do Brasil.

		SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3
Arranjo Fotovoltaico	Potência Instalada:	1250 Wp	2080 Wp	3710 Wp
	Potência Individual:	250 Wp	260 Wp	265 Wp
	Quantidade de Módulos:	5	8	14
	Strings:	1	1	2
Inversor	Modelo:	PHB1500-SS	PHB3000-SS	ABB PVI 3.6 OUTD
	Potência:	1500 W	3000 W	3600 W
Ângulos	Inclinação:	25 °	20 °	20 °
	Azimute:	60 ° Leste	60 ° Oeste	0 °
Local de Instalação		Turvo/SC	Turvo/SC	Criciúma/SC
Tempo de monitoramento		12 meses	12 meses	12 meses

Tabela 1: Características dos SFCRs instalados nas unidades prosumidoras.

O perfil residencial de consumo e a geração de energia elétrica medida foram avaliados a partir de dados dos sistemas coletados durante 12 meses. Os dados de geração de energia elétrica medida dos SFCRs foram levantados a partir da plataforma dos fabricantes, através do monitoramento remoto integrado aos inversores e com base nas faturas de energia elétrica mensais foram extraídos os dados de consumo da rede e injeção de energia elétrica na rede. Com estas informações foi determinada a energia elétrica consumida instantaneamente de cada unidade prosumidora.

A análise de fluxo de caixa descontado foi baseada em Holdermann (Holdermann et al., 2014), neste cálculo são descontados os custos futuros para apresentar o valor líquido no presente. A partir dos dados de geração de energia elétrica anual, investimento inicial, tarifa atual, estimativa de aumento da tarifa de energia elétrica, degradação do sistema fotovoltaico, operação e manutenção (O&M) e vida útil de 25 anos, foram estimados os fluxos de caixa descontado para o cenário de tarifa e tributação atuais. Para análise foi considerado o valor de 7,0 R\$/Wp, degradação do sistema fotovoltaico de 0,5 % ao ano, O&M de 0,5 % ao ano, tarifa de 0,65 R\$/kWh e reajuste anual de 10 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2, 3 e 4, são apresentados os dados extraídos dos medidores bidirecionais, que são o consumo abatido pela rede (kWh) e a energia elétrica injetada na rede (kWh). A energia consumida

instantaneamente pelas unidades prosumidoras, ou seja, aquela que não foi registrada pelo medidor, pode ser calculada a partir dos dados de geração total de energia elétrica registrada pelo inversor subtraindo-se o montante de energia elétrica que foi injetada na rede. O consumo total de energia elétrica da residência, representa a quantidade de energia elétrica que deveria ser fornecida pela rede, caso não houvesse sistema de geração de energia elétrica e é a soma entre o consumo da rede e a energia elétrica que foi consumida instantaneamente.

Mês Ref.	Consumo da Rede (kWh)	Injetado (kWh)	Energia consumida inst. (kWh)	Geração Total (kWh)	Consumo sem Geração (kWh/mês)
jan-17	244,00	93,00	77,91	170,91	321,91
fev-17	214,00	87,00	75,81	162,81	289,81
mar-17	247,00	82,00	69,12	151,12	316,12
abr-17	144,00	76,00	52,89	128,89	196,89
mai-17	110,00	76,00	42,16	118,16	152,16
jun-17	123,00	54,00	24,72	78,72	147,72
jul-17	99,00	79,00	37,23	116,23	136,23
ago-17	106,00	83,00	40,26	123,26	146,26
set-17	116,00	94,00	41,21	135,21	157,21
out-17	100,00	70,00	33,67	103,67	133,67
nov-17	110,00	110,00	51,51	161,51	161,51
dez-17	118,00	92,00	48,21	140,21	166,21
Total	1731,00	996,00	594,70	1590,70	2326,00
Média	144,30	83,00	49,60	132,60	193,80
Desvio Padrão	56,50	14,10	16,90	26,90	71,90

Tabela 2: Dados de consumo e geração da residência com SFCR 1.

Mês Ref.	Consumo da Rede (kWh)	Injetado (kWh)	Energia consumida inst. (kWh)	Geração Total (kWh)	Consumo sem Geração (kWh/mês)
jan-17	144,00	156,00	94,00	250,00	238,00
fev-17	148,00	161,00	109,00	270,00	257,00
mar-17	192,00	138,00	92,00	230,00	284,00
abr-16	146,00	148,00	79,00	227,00	225,00
mai-16	167,00	112,00	66,00	178,00	233,00
jun-16	169,00	105,00	61,00	166,00	230,00
jul-16	213,00	97,00	63,00	160,00	276,00
ago-16	160,00	144,00	69,00	213,00	229,00
set-16	167,00	140,00	79,00	219,00	246,00
out-16	156,00	157,00	73,00	230,00	229,00
nov-16	124,00	193,00	77,00	270,00	201,00
dez-16	106,00	203,00	87,00	290,00	193,00
Total	1892,00	1754,00	949,00	2703,00	2841,00
Média	157,70	146,20	79,10	225,20	236,70
Desvio Padrão	28,20	32,00	14,30	41,60	26,60

Tabela 3: Dados de consumo e geração da residência com SFCR 2.

Mês Ref.	Consumo da Rede (kWh)	Injetado (kWh)	Energia consumida inst. (kWh)	Geração Total (kWh)	Consumo sem Geração (kWh/mês)
jan-17	745,00	209,00	273,28	482,28	1018,28
fev-17	625,00	224,00	211,36	435,36	836,36
mar-17	622,00	245,00	222,45	467,45	844,45
abr-17	398,00	186,00	160,91	346,91	558,91
mai-17	328,00	219,00	141,44	360,44	469,44
jun-17	410,00	118,00	93,62	211,62	503,62
jul-17	347,00	238,00	139,13	377,13	486,13
ago-17	352,00	239,00	121,98	360,98	473,98
set-17	400,00	227,00	165,26	392,26	565,26
out-17	345,00	182,00	131,71	313,71	476,71
nov-17	358,00	271,00	184,84	455,84	542,84
dez-17	346,00	237,00	181,88	418,88	527,88
Total	5276,00	2595,00	2027,86	4622,86	7304,00
Média	439,70	216,30	169,00	385,20	608,70
Desvio Padrão	140,80	39,60	49,50	75,60	183,80

Tabela 4: Dados de consumo e geração da residência com SFCR 3.

O desvio padrão dos indicadores de desempenho é mais acentuado na residência com SFCR 3, indicando maior sazonalidade, tanto no perfil de consumo como no perfil de geração de energia elétrica.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os histogramas de energia elétrica gerada mensalmente pelos SFCRs. Para os meses de janeiro, fevereiro e março das unidades prosumidoras com os sistemas 1 e 3, o consumo elevado pode ser atribuído ao condicionamento de ar, que para a região sul do Brasil, no verão, esses equipamentos podem representar 27 % do consumo de energia elétrica em uma residência, sendo que esta participação é da ordem de apenas 3 % no período de inverno (Ghisi et al, 2007). O abatimento de consumo de energia elétrica foi de 68 %, 95 % e 63 % para os sistemas 1, 2 e 3, respectivamente.

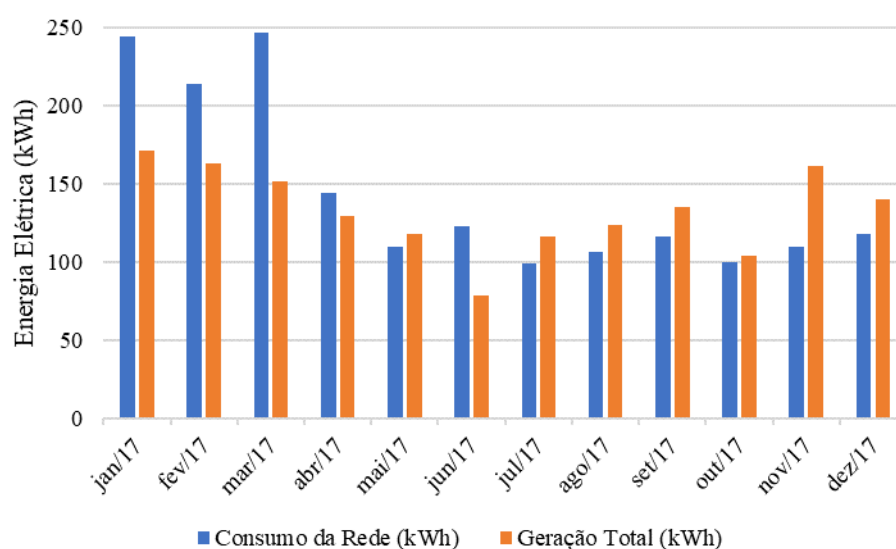


Figura 3: Consumo e geração mensal de energia elétrica, residência com Sistema 1.

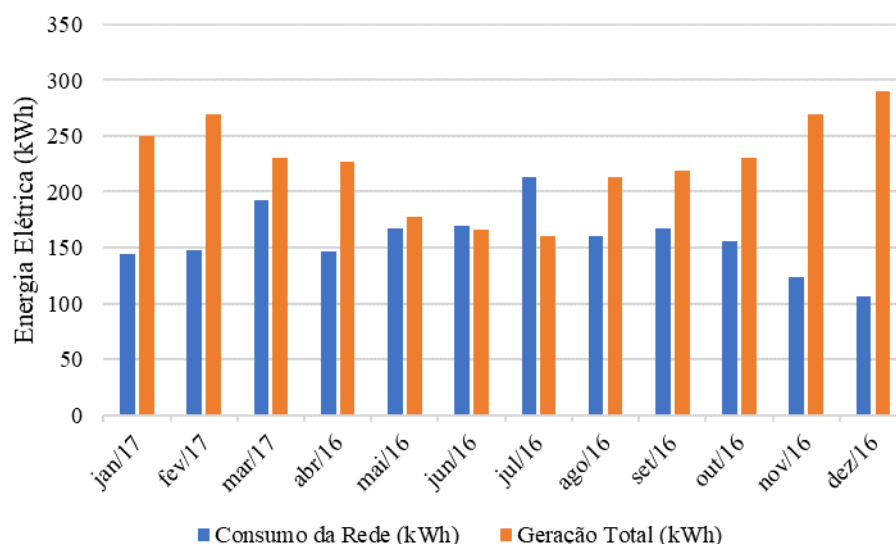


Figura 4: Consumo e geração mensal de energia elétrica, residência com Sistema 2.

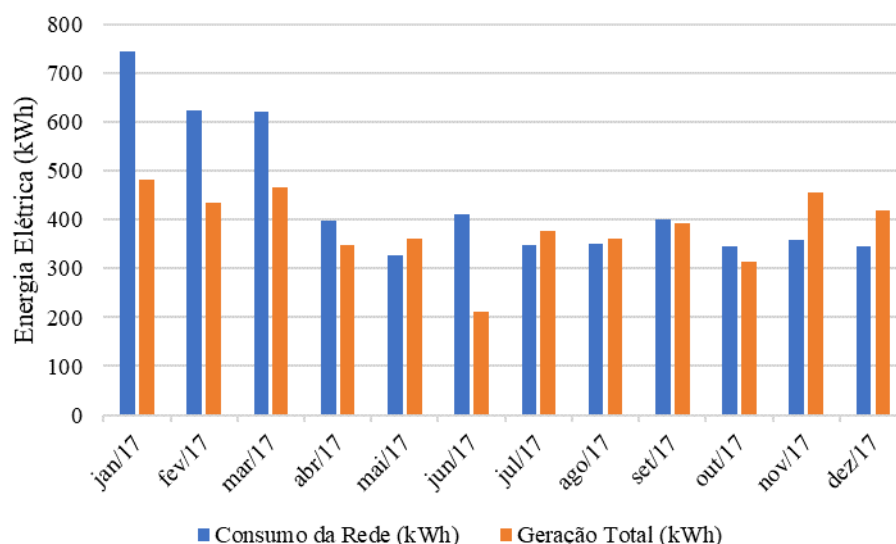


Figura 5: Consumo e geração mensal de energia elétrica, residência com Sistema 3.

A Tabela 5 apresenta índices de geração de energia elétrica e produtividade dos sistemas fotovoltaicos (FV) das unidades prossumidoras. A produtividade ou *yield final*, é a razão entre a energia elétrica gerada (kWh) por unidade de potência instalada dos sistemas (kWp) ao longo de um período, normalmente mensal ou anual. A produtividade pode apresentar variações de acordo com a tecnologia dos módulos fotovoltaicos, ângulo de orientação, ângulo de inclinação, sombreamento e sujeira (Saber et al, 2014).

A Figura 6 apresenta os índices de energia elétrica injetada na rede mensalmente para as unidades prossumidoras. Para o SFCR 3 os menores índices de injeção de energia elétrica acontecem nos meses de verão, o que indica o aumento das cargas consumindo energia elétrica durante a geração, provavelmente pelo uso de condicionadores de ar durante o dia. Para o SFCR 3 a média mensal de energia elétrica injetada na rede foi de 57 % e o desvio padrão foi de 6 %. O mesmo perfil ocorre no SFCR 1, com média de injeção de energia elétrica de 63 % e desvio padrão de 6 %. No SFCR 2 não é observado essa sazonalidade no uso dos equipamentos elétricos durante o período que ocorre a geração de energia elétrica, sendo que a média mensal de injeção foi de 65 % e o desvio padrão foi de apenas 4 %.

	SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3
Geração FV Total (kWh)	1590,70	2703,00	4622,90
Produtividade (kWh/kWp)	1272,50	1299,50	1246,10
Média Mensal de Geração (kWh)	132,50	225,20	385,20
Desvio Padrão Mensal (kWh)	26,80	41,60	75,60

Tabela 5: Índices de geração de energia elétrica e produtividade anuais dos sistemas fotovoltaicos.

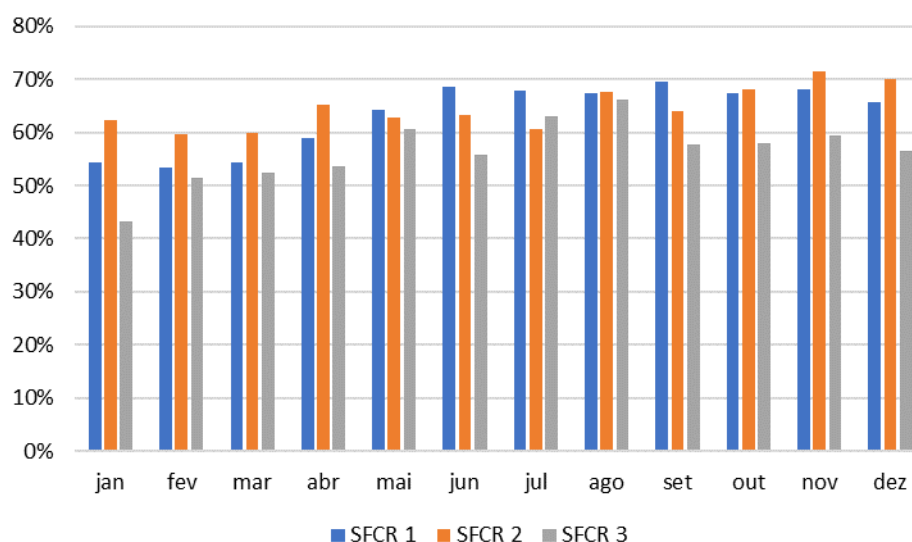


Figura 6: Perfil de injeção de energia elétrica mensal das unidades prossumidoras.

Os índices de injeção de energia elétrica e consumo instantâneo anuais podem ser observados na Figura 7. Este perfil com injeções de energia elétrica acima de 50 % da energia total gerada é bastante característico de residências familiares, onde provavelmente todos os moradores passem boa parte do dia fora de casa (Scarabelot et al., 2018). O número de pessoas em uma residência não tem impacto significativo no consumo, mas sim o nível de ocupação, ou seja, quanto tempo as pessoas permanecem na residência (Wallis et al, 2016).

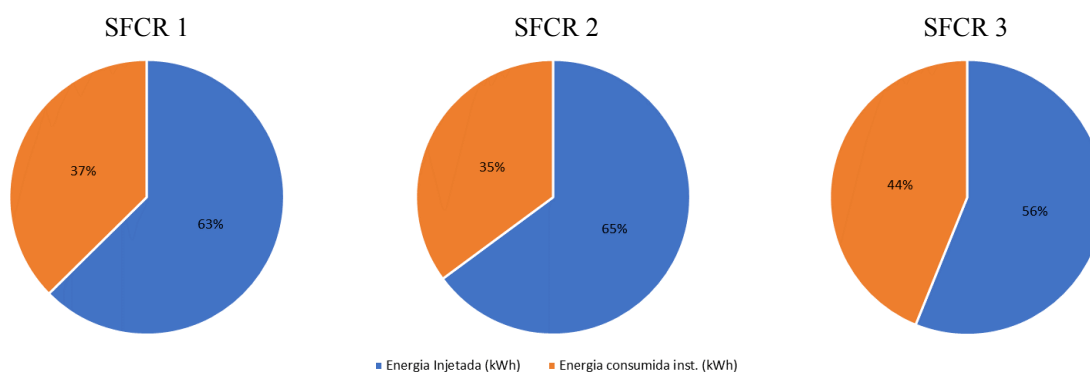


Figura 7: Perfil de consumo das unidades prossumidoras.

Segundo (Silva et al., 2014) os picos de consumo ocorrem ao meio dia, pelo uso da cozinha e as 7:00 h e 19:00 h pelo uso do chuveiro elétrico, esses equipamentos representam a maior potência presente em uma residência, predominando o consumo em horários em que não há geração de energia elétrica a

partir do sistema fotovoltaico. No restante do tempo a residência apresenta consumo somente de equipamentos em modo de espera, fazendo com que grande parte da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico seja injetada na rede da concessionária (Scarabelot et al., 2018). Verifica-se que há um perfil bem caracterizado de geração de energia elétrica e consumo de energia de energia elétrica.

A Figura 8 apresenta o fluxo de caixa descontado para os investimentos aplicados nos sistemas fotovoltaicos, considerando os valores à vista. O fluxo de caixa descontado considera a taxa de desconto anual que é o valor economizado nas faturas de energia elétrica, apresentando um resultado confiável para longos períodos de análise. As considerações sobre os indicadores econômicos foram definidas na seção de materiais e métodos descrita anteriormente.

O retorno de investimento dos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em unidades prosumidoras residenciais foi de 79 meses, 78 meses e 81 meses, para SFCR 1, SFCR 2 e SFCR 3, respectivamente. Mostra-se a viabilidade do investimento para todas as unidades prosumidoras, visto que os fabricantes dos módulos fotovoltaicos estimam vida útil de 30 anos, dessa forma a unidade prosumidora após atingir o retorno financeiro ainda teria mais de 23 anos de benefício com a redução dos valores mensais de suas faturas.

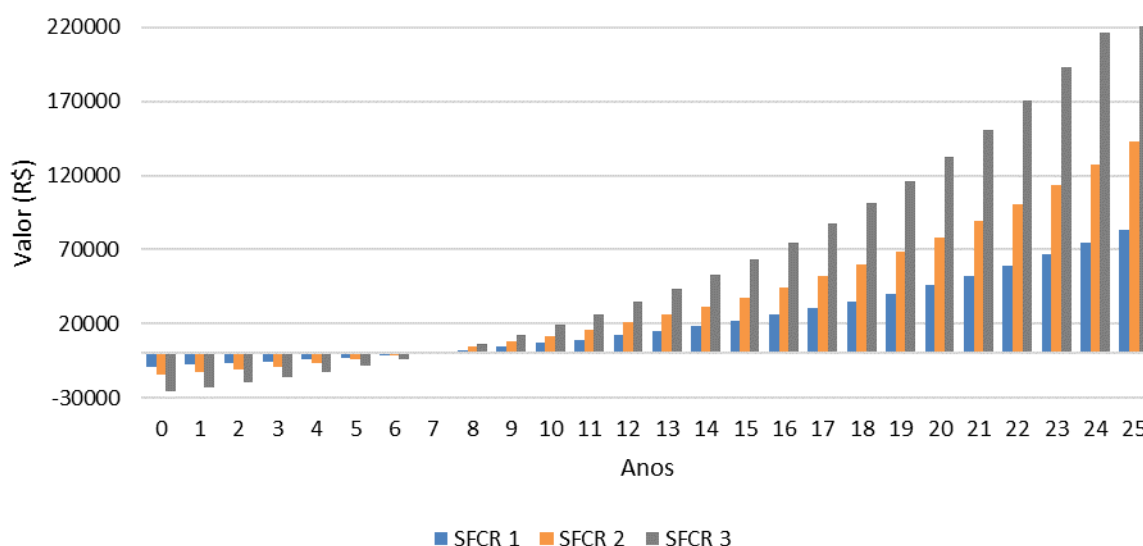


Figura 8: Fluxo de caixa descontado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação energética de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em operação instalados em unidades prosumidoras residenciais localizadas nas cidades de Turvo e Criciúma, sul do Brasil. Também foram calculados os retornos de investimento para cada sistema. Foram apresentadas as variações de geração de energia elétrica mensal, verificando-se maior produtividade no SFCR 2 de 1299,5 kWh/kWp.

O abatimento de consumo das unidades prosumidoras ficou entre 63 e 95 % enquanto que a energia elétrica que é injetada na rede representou uma fração variável entre 56 % e 65 % da energia elétrica gerada pelos sistemas fotovoltaicos, o perfil de consumo de unidades prosumidoras residenciais

mostra que grande parte da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico é injetada na rede da concessionária.

O retorno de investimento para os sistemas fotovoltaicos, considerando investimento à vista, foi de aproximadamente 6 anos e 7 meses. Dessa forma os sistemas fotovoltaicos devem ser aplicados de maneira adequada em relação a viabilidade técnica, custo do investimento e tarifa para que seja possível a rentabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2012). Micro e Minigeração Distribuída (REN 482/2012) - ANEEL.
- ANEEL. (2015). National Electric Energy Agency Normative (ANEEL), Rio de Janeiro, Brazil. Resolution No. 687/2015.
- ANEEL. (2017). National Electric Energy Agency Normative (ANEEL), Rio de Janeiro, Brazil. Consumer Units With Distributed Generation. Recuperado de http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Classe.asp.
- Breyer, C., & Gerlach, A. (2013). Global overview on grid-parity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 121–136. Recuperado de <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.1254>
- Darghouth, N. R., Barbose, G., & Wiser, R. (2011). The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers in California. *Energy Policy*, 39(9), 5243–5253.
- Davi, G. A., Caamano-Martin, E., Ruther, R., & Solano, J. (2016). Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. *Energy and Buildings*, 120, 19–29.
- Eid, C., Reneses Guillén, J., Frías Marín, P., & Hakvoort, R. (2014). The economic effect of electricity net-metering with solar PV: Consequences for network cost recovery, cross subsidies and policy objectives. *Energy Policy*, 75, 244–254. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514005023>
- Ghisi, E., Gosch, S., & Lamberts, R. (2007). Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. *Energy Policy*, 35(8), 4107–4120. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507000559>
- Holdermann, C., Kissel, J., & Beigel, J. (2014). Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, 67, 612–617. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513011944>
- Islam, M., Mekhilef, S., & Hasan, M. (2015). Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 69–86. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.009>
- Lacchini, C., & Rüter, R. (2015). The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. *Renewable Energy*, 83, 786–798. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.045>
- Saber, E. M., Lee, S. E., Manthapuri, S., Yi, W., & Deb, C. (2014). PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings. *Energy*, 71, 588–595. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214005477>
- Scarabelot, L. T., Rampinelli, G. A., & Rambo, C. R. (2018). Avaliação do sistema de compensação de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos em unidades prosumidoras residenciais. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018*, 0. Recuperado de <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/193>
- Silva, A. S., Luiz, F., Mansur, A. C., Vieira, A. S., Schaefer, A., & Ghisi, E. (2014). Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 2(0), 7–18. Recuperado de <https://journals.aau.dk/index.php/sepm/article/view/265>
- Villareal, M. J. C., & Moreira, J. M. L. (2016). Household consumption of electricity in Brazil between 1985 and 2013. *Energy Policy*, 96, 251–259. <http://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2016.04.030>

Wallis, H., Nachreiner, M., & Matthies, E. (2016). Adolescents and electricity consumption; Investigating sociodemographic, economic, and behavioural influences on electricity consumption in households. *Energy Policy*, 94, 224–234. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421516301501>

ABSTRACT: This paper presents the analysis of net metering of photovoltaic systems in residential prosumers. The analysis is performed from measured data. For the study are considered economic aspects and profiles of electric energy injected into the grid. Photovoltaic systems are 1.25 kW_p, 2.08 kW_p and 3.71 kW_p. The yield final was 1272.6 kWh/kW_p, 1299.5 kWh/kW_p and 1246.1 kWh/kW_p. The electric energy that is injected into the grid represents a fraction of 63 %, 65 % and 56 % of the electric energy generated. The reduction in electricity consumption was 68 %, 95 % and 63 %. The payback time was approximately 6 years and 7 months.

Keywords: solar energy, distributed generation, prosumer, net metering.