

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

COMPARATIVO DE CUSTOS DA ALTERAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO PARA FOTOVOLTAICO INTERLIGADO À REDE DA CONCESSIONÁRIA – ESTUDO DE CASO¹

JOEL GUSTAVO TELEKEN², JONATHAN DIETER², MARCIO RICARDO GRAFF² &
MAURÍCIO ROMANI²

¹Publicado no Ano de 2019;

²Universidade Federal do Paraná- UFPR, marcio_graff@hotmail.com.

Resumo

A energia elétrica pode ser gerada da conversão direta da radiação solar através de placas produzidas com materiais fotossensíveis, que possuem a característica de conversão de energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Parte da iluminação externa do Setor Palotina, da Universidade Federal do Paraná, é fornecida por sistemas fotovoltaicos isolados (SFI's). Os atuais sistemas apresentam funcionamento insatisfatório e altos custos de manutenção, por esses motivos foi elaborado este estudo de caso, para analisar a viabilidade econômica e técnica de se alterar os atuais SFI's em um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR). Foram levantados os custos para a alteração dos SFI's em SFCR, assim como a manutenção dos dois sistemas. Com os resultados obtidos, foi possível fazer uma análise dos custos unitários da energia elétrica gerada pelos dois sistemas de energia fotovoltaica e compará-los com as tarifas da energia da concessionária. Como resultado, verificou-se que a substituição dos atuais SFI's em SFCR é tecnicamente possível e as estimativas apontam retorno de investimento em 9 anos. Caso a instituição não invista na transformação acima apontada, desconectar as luminárias dos atuais SFI's e conectá-las na rede elétrica da concessionária, também se apresentou como uma alternativa mais econômica aos cofres públicos.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, Sistemas fotovoltaicos isolados, Energia Solar.

**COMPARISON OF COSTS OF THE AMENDMENT OF THE
PHOTOVOLTAIC SYSTEM ISOLATED FOR PHOTOVOLTAIC
INTERCONNECTED TO THE CONCESSIONAIRE'S NETWORK - CASE STUDY**

Abstract

Upon searching for options to obtain more sustainable energy, the solar energy appears as one of the most promising sources because it is considered a source of renewable energy which is abundant and non-polluting. This energy results from the direct conversion of solar energy into electric power, through plates produced with photo-sensible materials whose characteristic is the conversion of radiant energy into electric energy through the photovoltaic effect. Part of the external illumination at the Federal University of Paraná, Sector Palotina, comes from photovoltaic plates which were installed in autonomous system (it stores the energy in batteries) and isolated (it does not have a connection with the electric energy distribution net). Because the current isolated system does not present satisfying functioning and the maintenance costs are high, this case study was carried out in order to analyze the economic and technical feasibility of changing the current system (isolated) for an interconnected system. All necessary equipment, materials and services for this change were analyzed, as well as a cost estimation survey for maintaining both systems. With the obtained results, it was possible to carry out an analysis of the unit costs for the electric energy generated by both kinds of photovoltaic energy system and to compare them with the energy bought from the light company. As a result, it was observed that the replacement of the current Isolated Photovoltaic System for an interconnected one is technically possible and the estimations point to a pay back in 9 years. In case the institution does not invest in this transformation, another possible and more economical alternative would be disconnecting the light fixtures from the current isolate system and connecting them to the light company's electric net.

Keywords: Photovoltaic energy, Isolated Photovoltaic System, Solar Energy.

Introdução

A energia solar é considerada uma fonte de energia renovável, abundante e não poluente. A produção de energia solar cresce em um ritmo acelerado no mundo, porém apresenta pequena contribuição dentro da matriz energética mundial (IEA, 2014).

A geração de energia solar possui boa confiabilidade, pois é uma fonte segura e os equipamentos de geração possuem vida útil média de 25 anos e rápida capacidade de implantação (APINE, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como: sistemas fotovoltaicos isolados, onde a energia gerada é integralmente consumida em circuitos elétricos conectados somente ao sistema gerador e sistemas fotovoltaicos interligados à rede, que se caracterizam por estarem conectados à rede de distribuição de uma concessionária de energia. Há também o sistema híbrido resultado da junção dos dois sistemas.

Em alguns países estão surgindo incentivos para ampliar a utilização de fontes renováveis para geração de energia elétrica. Um exemplo é a cidade de Palo Alto, na Califórnia, que a partir de 2015, passou ter novas regulamentações para construções, como por exemplo, que passaram a exigir que a estrutura de telhados seja projetada e executada de maneira a suportar as cargas das placas fotovoltaicas (PERRY, 2015).

O Brasil possui características naturais favoráveis à geração fotovoltaica, sendo um país de grande incidência de raios solares, principalmente nas regiões Nordeste e Norte (APINE, 2017).

Em 17 de abril de 2012, a ANEEL aprovou a Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012). As regras destinam-se ao acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de rede de distribuição de energia elétrica. A resolução criou um programa de compensação de energia elétrica, no qual a energia gerada pela unidade consumidora, através da microgeração ou minigeração distribuída, compensará o consumo de energia elétrica ativa. Estas regras são válidas para os consumidores que utilizam fontes incentivadas de energia (ANEEL, 2012).

Foi definida na Resolução Normativa Nº 687/2015 como microgeração distribuída as centrais geradoras de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW conectadas à rede de distribuição (ANEEL, 2015).

Ao descentralizar a geração de energia elétrica, se reduz a necessidade de investimentos em redes de transmissão, de interligação regional e de distribuição para o

tráfego da energia produzida. Com a redução das linhas de transmissão, há economias financeiras que são distribuídas entre consumidores e geradores. (APINE, 2017).

O ambiente estudado é identificado como a Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizado em Palotina, Município do Oeste do Paraná. Atualmente parte da iluminação externa do Setor Palotina é fornecida por 68 sistemas de iluminação isolados denominados SFI's. Onde cada sistema é composto por bateria, controlador de carga, luminária em led de 40 W e placa fotovoltaica de 100 Wp. Devido ao insatisfatório desempenho e os altos custos de manutenção dos SFI's, elaborou-se este estudo de caso onde serão analisadas as condições técnicas e os custos para transformá-los em SFCR, para isso:

- a) Levantou-se o consumo de energia das luminárias alimentadas pelos SFI's;
- b) Foi levantada a quantidade de energia gerada pelos módulos fotovoltaicos;
- c) Estimaram-se os custos de alteração dos SFI's em SFCR e os custos de manutenção dos dois sistemas;
- d) Compararam-se os custos unitários da energia elétrica das fontes:
 - SFI's (existentes);
 - SFCR após alterar os SFI's existentes;
 - Concessionária local sem geração própria.

Devido aos benefícios da geração distribuída, os resultados desse comparativo de custos entre os SFI's existentes e o investimento para transformação em um SFCR, poderão servir de diretrizes na tomada de decisões em relação ao aproveitando das placas fotovoltaicas já adquiridas pela UFPR, fazendo um melhor uso dos recursos públicos.

Materiais e métodos

Os comparativos econômicos da conversão dos SFI's em SFCR foram realizados através de estimativas e simulações com equações matemáticas, utilizando dados técnicos obtidos de luminárias, módulos fotovoltaicos, tarifas de energia elétrica e período médio do funcionamento do sistema de iluminação.

O consumo das luminárias que atualmente são alimentadas pelos SFI's pode ser calculado pela EQUAÇÃO (01):

$$E_c = \frac{P_L}{1000} \times T \quad (01)$$

E_c = energia consumida (kWh);

P_L = potência das luminárias (W);

T = período de tempo de consumo (h).

Em conformidade com Mamede (2007), para o grupo tarifário “A4-Verde” da ANEEL, no qual se enquadra o Setor Palotina da UFPR, o custo do consumo de energia é diferenciado para os horários da ponta e fora da ponta, além disso, é adicionada aos custos de consumo a contratação de demanda, bem como a cobrança de possíveis multas. Assim sendo, calcula-se o custo de energia elétrica adquirida da concessionária através da EQUAÇÃO 02.

$$C_t = (E_{cmp} \times T_{cp}) + (E_{cmfp} \times T_{cfp}) + M_{ad} + (D \times T_d) \quad (02)$$

C_t = custo total mensal (R\$);

E_{cmp} = energia consumida mensal na ponta (kWh);

T_{cp} = tarifa de consumo na ponta (R\$/kWh);

E_{cmfp} = energia consumida mensal fora da ponta (kWh);

T_{cfp} = tarifa de consumo fora da ponta (R\$/kWh);

M_{ad} = multas e adicionais de bandeira (R\$);

D = demanda contratada (kW);

T_d = tarifa demanda (R\$/kW).

Calculou-se a estimativa de consumo médio de energia das luminárias em funcionamento diariamente do pôr do Sol até às 24h, nos horários de verão e inverno. A estimativa de consumo baseou-se nos registros dos horários do pôr do Sol para os anos de 2015 e 2016. (ZÊNITE, 2016).

Segundo Pinho e Galdino (2014), os módulos fotovoltaicos geralmente têm garantia de rendimento mínimo de 25 anos. Por isso, este estudo de caso baseou-se no mesmo período de tempo. Para calcular a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos seguiu-se o modelo proposto por Fortes e Ferreira (2013), dado pela EQUAÇÃO 03.

$$E_{pd} = E_s \times A_p \times \eta \times T_d \times P_d \quad (03)$$

E_{pd} = energia produzida diária (kWh/dia);

E_s = irradiação recebida pelo Sol por dia (kWh/m²);

A_p = área de placa (m²);

η = eficiência de conversão do módulo;

T_d = taxa de desempenho do sistema;

P_d = perda de desempenho.

A eficiência de conversão dos módulos (η) pode ser calculada através da EQUAÇÃO (04):

$$\eta = \frac{P_p}{1000 \times A_p} \quad (04)$$

η = eficiência de conversão do módulo;

P_p = potência de pico (Wp);

A_p = área da placa (m²).

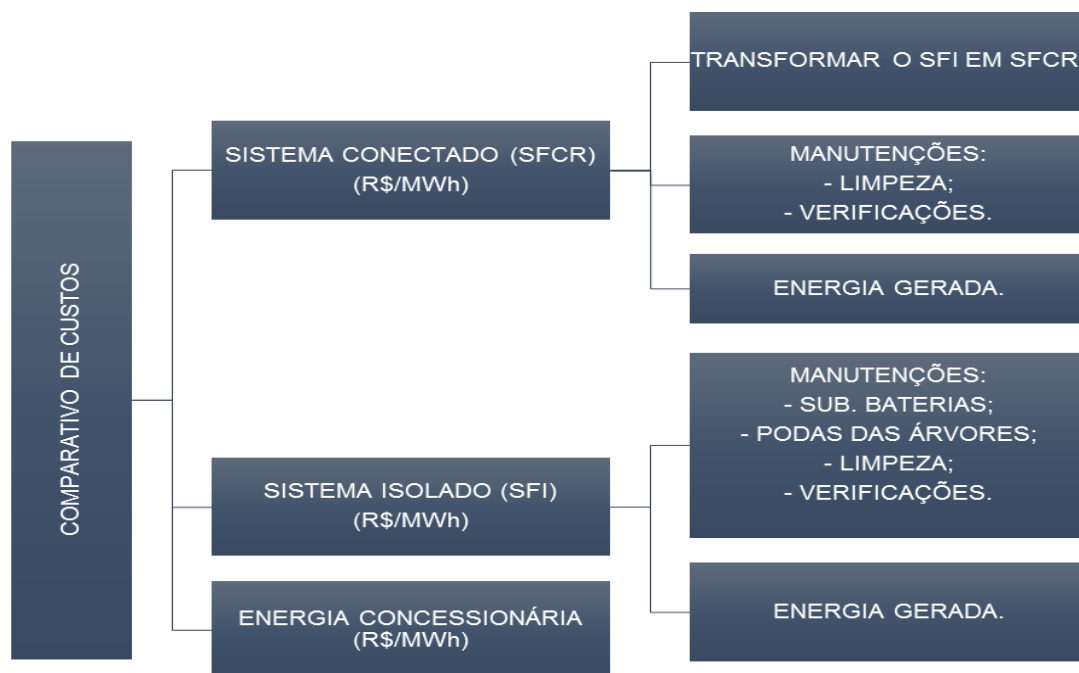
De acordo com as especificações técnicas da Xiamen Solar First Energy Technology Co. Ltd fabricante dos módulos, a potência máxima de pico das placas é de 100 Wp.

Os autores Pinho e Galdino (2014) informam que os sistemas fotovoltaicos quando instalados em ambientes bem ventilados e não sombreados, apresentam uma taxa de desempenho (T_d) entre 70 a 80%, que pode ser obtida nas condições de irradiação solar encontrada no Brasil. Adotou-se a taxa de desempenho (T_d) de 70% por ser a mais desfavorável.

Segundo Osterwald et. al (2002), a perda de desempenho (P_d) de potência nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino é de aproximadamente 0,71% ao ano.

Na FIGURA 01 estão apresentadas as variáveis que compõem o custo unitário das fontes de energia elétrica SFI's, SFCR e da concessionária.

FIGURA 01 – CUSTOS DE ENERGIA ELÉTRICA.



FONTE: AUTORES (2016).

Para transformar os SFI's em SFCR consideraram-se os custos para:

- a) Retirar os módulos fotovoltaicos, baterias e os controladores de carga dos postes de iluminação, mantendo as luminárias em suas atuais posições;
- b) Incluir fontes de chaveamento eletrônico CA/CC para as 68 luminárias em led de 40 W e 12 Vcc;
- c) Instalar uma rede de cabos elétricos, devidamente dimensionados para a alimentação de cada luminária;
- d) Ampliar os quadros elétricos para conectar as luminárias;
- e) Instalar as placas fotovoltaicas sobre a cobertura de um prédio;
- f) Atender as Normas Técnicas.

A atualização monetária dos custos com manutenção foi estimada com base nos dados médios anuais do INCC (Índice Nacional de Custo da Construção), elaborado pela FGV (Fundação Getúlio Vargas).

Para a energia adquirida da rede pública, a atualização monetária das tarifas foi embasada no histórico dos reajustes da concessionária local (Copel).

A Unidade de Infraestrutura e Manutenções do Setor Palotina da UFPR informou que, as baterias dos SFI's necessitam serem substituídas a cada 24 meses, caso contrário, as mesmas tornam-se ineficientes.

Resultados e discussão

Nesta seção serão estimados e analisados o consumo das luminárias e a geração dos sistemas SFI e SFCR, comparando as tarifas da concessionária com os custos unitários da energia gerada por estes sistemas.

Consumo das luminárias

Dividiu-se o consumo das luminárias e a geração de energia em dois períodos anuais, horários de verão e inverno, motivado pelas diferentes definições dos horários da ponta. Segundo a ANEEL no verão é definido o horário da ponta entre 19h e 22h e no inverno das 18h às 21h.

No ano de 2015 iniciou-se o horário brasileiro de verão no dia 18 de outubro, permanecendo até 21 de fevereiro de 2016. A TABELA 01 apresenta o registro dos horários médios de nascer e pôr do Sol no horário de verão.

TABELA 01 – NASCER E PÔR DO SOL NO HORÁRIO DE VERÃO 2015/2016.

PERÍODO	HORÁRIO MÉDIO DO NASCER DO SOL	HORÁRIO MÉDIO DO PÔR DO SOL
De 18/10/2015 a 31/10/2015	6h53min *	19h44min *
No mês de 11/2015	6h41min *	20h12min *
No mês de 12/2015	6h42min *	20h19min *
No mês de 01/2016	7h00min *	20h43min *
De 01/02/2016 a 21/02/2016	7h18min *	20h18min *
Média horário de verão	6h53min *	20h19min *

* UTC -3

FONTE: ZÊNITE (2016).

Analogamente a TABELA 02 apresenta os registros no horário de inverno.

TABELA 02 – NASCER E PÔR DO SOL NO HORÁRIO DE INVERNO DE 2015.

PERÍODO	HORÁRIO MÉDIO DO NASCER DO SOL	HORÁRIO MÉDIO DO PÔR DO SOL
De 22/02/2015 a 28/02/2015	6h27min *	19h08min *
No mês de 03/2015	6h36min *	19h02min *
No mês de 04/2015	6h49min *	18h20min *
No mês de 05/2015	7h03min *	17h59min *
No mês de 06/2015	7h15min *	17h55min *
No mês de 07/2015	7h16min *	18h04min *
No mês de 08/2015	7h00min *	18h17min *
No mês de 09/2015	6h31min *	18h28min *
De 01/10/2015 a 17/10/2015	6h07min *	18h37min *
Média horário inverno	6h51min *	18h21min *

* UTC -3

FONTE: ZÊNITE (2016).

Baseado nos dados apresentados na TABELA 01 e na TABELA 02 calculou-se o consumo das luminárias no horário de verão em funcionamento das 20h19min (horário de Brasília) até às 22h no horário da ponta, e das 22h às 24h fora do horário da ponta. Analogamente calculou-se o consumo no período de inverno das 18h21min até às 21h no horário da ponta, e das 21h até às 24h fora da ponta.

O Setor Palotina possui demanda contratada de 500 kW, sendo que a potência total das luminárias é de 2,72 kW, ou seja, 0,54% da demanda contratada, por este motivo desconsiderou-se a contratação de demanda adicional.

Conforme apresentado na TABELA 03, a energia a ser consumida pelas luminárias é de 4.889,48 kWh/ano, que corresponde a um custo médio de R\$ 5.138,88/ano.

TABELA 03 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA ANUAL.

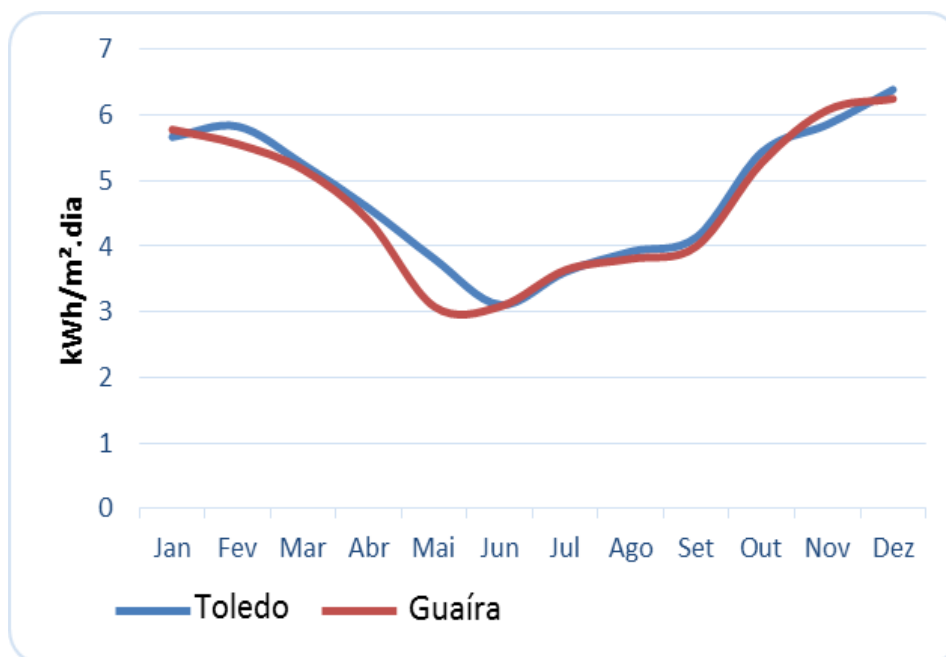
Período-horário	Horário	Potência total luminárias (W)	Dias de funcionamento (dias/mês)	Tempo consumo diário (h)	Energia consumida (kWh)	Tarifas (R\$/kWh)	Custo (R\$)
Verão	Na ponta	2.720	30	1,68	137,09	1,637617	224,50
	Fora ponta	2.720	30	2,00	163,20	0,539252	88,00
Inverno	Na ponta	2.720	30	2,65	216,24	1,637617	354,12
	Fora ponta	2.720	30	3,00	244,80	0,539252	132,00
Total ano	-	-	-	-	4.889,48	-	5.138,88

FONTE: AUTORES (2017).

Capacidade de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos

Os dados de irradiação solar foram coletados no site da CRESESB. A cidade de Palotina não possui estação de observação, por isso foi calculada a média dos dados de Toledo e Guaíra para o ângulo de 24°, conforme o GRÁFICO 01.

GRÁFICO 01 – IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL



FONTE: CRESESB (2016).

Para o primeiro ano considerou-se que não há perda de desempenho, portanto $P_d = 1$.

As dimensões de cada placa fotovoltaica existente são 1.040 x 670 mm, portanto a área (A_p) é de 0,6968 m².

A energia gerada diária e mensal foi calculada através da EQUAÇÃO 03, conforme apresentado na TABELA 04.

TABELA 04 – CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA DIÁRIA E MENSAL.

Meses	Irradiação diária - E_s (kWh/m ²)	Eficiência do módulo - η	Taxa de desempenho - T_d	Energia produzida - E_{pd} (kWh/dia)	Energia produzida mensal 68 módulos E_m (kWh/mês)
Janeiro	5,17	0,1435	0,70	0,36	738,21
Fevereiro	5,44	0,1435	0,70	0,38	776,76
Março	5,40	0,1435	0,70	0,38	771,04
Abril	5,16	0,1435	0,70	0,36	736,78
Mai	4,77	0,1435	0,70	0,33	681,09
Junho	4,06	0,1435	0,70	0,28	579,71
Julho	4,74	0,1435	0,70	0,33	676,81
Agosto	4,59	0,1435	0,70	0,32	655,39
Setembro	4,33	0,1435	0,70	0,30	618,27
Outubro	5,25	0,1435	0,70	0,37	749,63
Novembro	5,46	0,1435	0,70	0,38	779,62
Dezembro	5,60	0,1435	0,70	0,39	799,61
Total	-	-	-	-	8.562,92

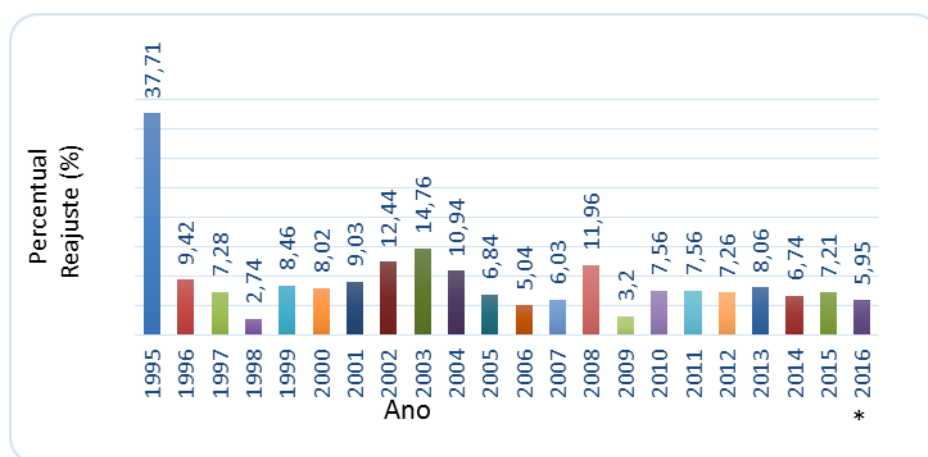
FONTE: AUTORES (2017).

Reajustes de custos

Estimaram-se os custos unitários de cada fonte de energia apresentada na FIGURA 01, para um período de 25 anos, para isso foi necessário aplicar índices de reajustes. Para os custos de manutenção considerou-se o histórico de reajuste anual do INCC/FGV. Analogamente para projeção futura das tarifas da concessionária, considerou-se a variação histórica das tarifas de energia.

Através do site Portal Brasil, observou-se que, de janeiro de 1995 a novembro de 2016, o percentual acumulado do INCC foi de 204,21%, como pode ser visualizado no GRÁFICO 02. Para o período calculou-se o índice anual médio de 9,31%.

GRÁFICO 02 – ÍNDICE MÉDIO DO INCC ANUAL.

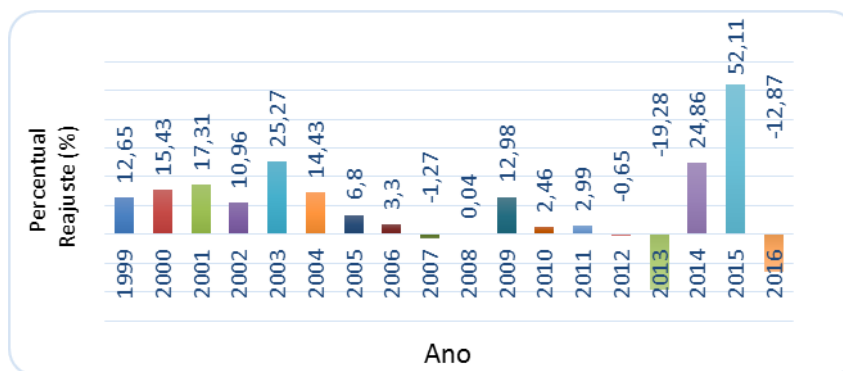


* Acumulado até Novembro de 2016.

FONTE: PORTAL BRASIL (2016).

As atualizações nas tarifas de energia da COPEL, apresentadas no GRÁFICO 03, demonstram que o reajuste acumulado entre janeiro de 1999 e dezembro de 2016 foi de 167,52%, que corresponde a um índice médio anual de 9,30667%.

GRÁFICO 03 – ÍNDICE DE REAJUSTES DAS TARIFAS DE ENERGIA.



FONTE: COPEL (2016).

Análise de custos da energia gerada pelo SFI

Para o cálculo da produção anual de energia dos SFI's, utilizou-se como parâmetro o consumo diário das luminárias de 4,89 MWh/ano.

Para manter os SFI's em pleno funcionamento foi necessário analisar os custos apresentados na TABELA 05.

TABELA 05 – CUSTOS DE MANUTENÇÕES DOS SFI'S.

ITEM	DESCRIÇÃO	UNID.	QTD	VALOR UNIT. (R\$)	VALOR TOTAL (R\$)
01	Troca de baterias (bienal)	pç	68	469,00	31.892,00/2 anos
02	Poda das árvores (2 vezes/ano)	h	24	50,00	1.200,00/ano
03	Limpeza das placas (4 vezes/ano)	h	20	50,00	1.000,00/ano
04	Inspeção conexões elétricas	h	10	50,00	500,00/ano

FONTE: AUTORES (2016).

A TABELA 06 apresenta as estimativas dos custos unitários da energia gerada pelos SFI's.

TABELA 06 – CUSTOS UNITÁRIOS DA ENERGIA GERADA PELOS SFI'S.

ANO	CUSTO DE MANUTENÇÃO (R\$)	TROCA DE BATERIAS (R\$)	REAJUSTE INCC (%)	ENERGIA GERADA (MWh)	CUSTO UNITÁRIO (R\$/MWh)
01	2.700,00	0,00	-	4,89	552,15
02	2.951,57	0,00	9,31	4,89	603,59
03	3.226,59	31.892,00	9,31	4,89	7.181,72
04	3.527,23	0,00	9,31	4,89	721,31
05	3.855,88	34.863,56	9,31	4,89	7.918,09
06	4.215,15	0,00	9,31	4,89	861,99
07	4.607,90	38.111,99	9,31	4,89	8.736,17
08	5.037,25	0,00	9,31	4,89	1.030,11
09	5.506,60	41.663,10	9,31	4,89	9.646,15
10	6.019,68	0,00	9,31	4,89	1.231,02
11	6.580,56	45.545,08	9,31	4,89	10.659,64
12	7.193,71	0,00	9,31	4,89	1.471,11
13	7.863,99	49.788,77	9,31	4,89	11.789,93
14	8.596,72	0,00	9,31	4,89	1.758,02
15	9.397,73	54.427,87	9,31	4,89	13.052,27
16	10.273,36	0,00	9,31	4,89	2.100,89
17	11.230,59	59.499,22	9,31	4,89	14.464,17
18	12.277,01	0,00	9,31	4,89	2.510,64
19	13.420,93	65.043,09	9,31	4,89	16.045,81
20	14.671,43	0,00	9,31	4,89	3.000,29
21	16.038,45	71.103,52	9,31	4,89	17.820,44
22	17.532,84	0,00	9,31	4,89	3.585,45
23	19.166,47	77.728,64	9,31	4,89	19.814,95
24	20.952,32	0,00	9,31	4,89	4.284,73
25	22.904,57	84.971,05	9,31	4,89	22.060,45
TOTA					
L	239.748,53	654.637,88	-	122,25	-

FONTE: AUTORES (2016).

As perdas de desempenho foram desconsideradas na produção anual de energia, pois conforme a TABELA 11 no 25º ano a geração seria de 7,23 MWh, superior a energia necessária para alimentar as luminárias em análise.

A TABELA 07 apresenta um comparativo de custos da compra de energia elétrica da concessionária local e da manutenção dos SFI's, a diferença entre os custos geram a coluna saldo anual.

O custo unitário da energia elétrica da concessionária para alimentação das luminárias deste estudo de caso é calculado através do custo total de R\$ 455.570,91 apresentado na TABELA 07, com projeção corrigida pela média dos índices apresentados no GRÁFICO 02, dividido pela energia consumida pelas luminárias em um período de 25 anos que totaliza 122,25 MWh conforme apresentado na TABELA 06. Portanto no período analisado o custo unitário médio resulta em R\$ 3.726,55/MWh.

O saldo acumulado em 25 anos, conforme apresentado na TABELA 07, demonstra que a manutenção dos SFI's resultará em um prejuízo estimado de R\$ 438.815,50 em relação à compra de energia da concessionária.

TABELA 07 – SALDO ENTRE CUSTO DA ENERGIA DA CONCESSIONÁRIA E SFI'S.

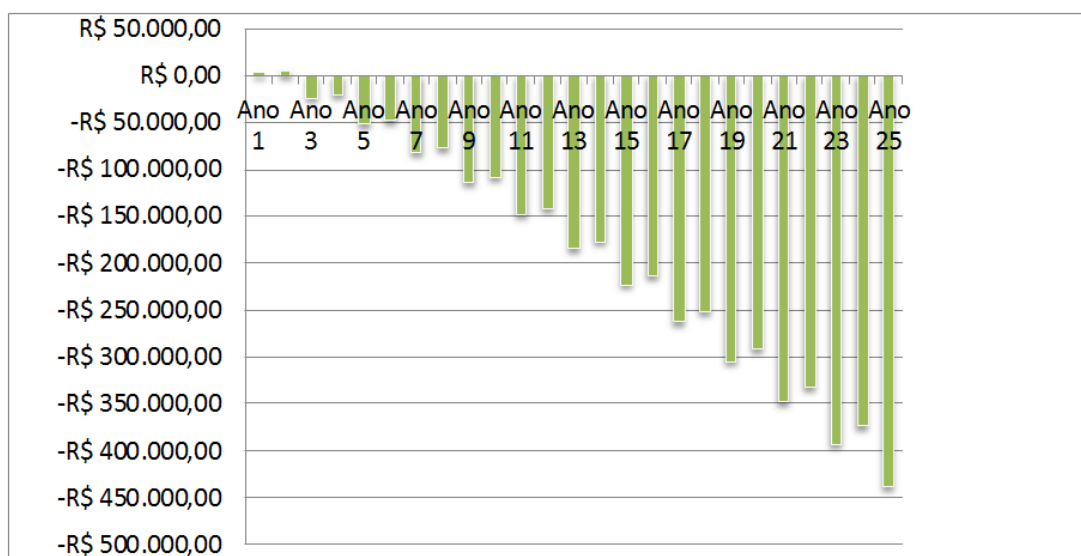
ANO	COMPRA CONCESSIONÁRIA (R\$)	CUSTOS DOS SFI'S (R\$)	SALDO ANUAL (R\$)
01	R\$ 5.138,88	2.700,00	2.438,88
02	R\$ 5.617,14	2.951,57	2.665,56
03	R\$ 6.139,91	35.118,59	-28.978,68
04	R\$ 6.711,33	3.527,23	3.184,10
05	R\$ 7.335,93	38.719,44	-31.383,51
06	R\$ 8.018,66	4.215,15	3.803,51
07	R\$ 8.764,93	42.719,89	-33.954,96
08	R\$ 9.580,65	5.037,25	4.543,41
09	R\$ 10.472,29	47.169,70	-36.697,40
10	R\$ 11.446,91	6.019,68	5.427,24
11	R\$ 12.512,24	52.125,64	-39.613,40
12	R\$ 13.676,71	7.193,71	6.483,00
13	R\$ 14.949,56	57.652,76	-42.703,20
14	R\$ 16.340,87	8.596,72	7.744,15
15	R\$ 17.861,66	63.825,60	-45.963,94
16	R\$ 19.523,98	10.273,36	9.250,62
17	R\$ 21.341,02	70.729,81	-49.388,79
18	R\$ 23.327,15	12.277,01	11.050,15
19	R\$ 25.498,14	78.464,02	-52.965,88
20	R\$ 27.871,16	14.671,43	13.199,73
21	R\$ 30.465,04	87.141,97	-56.676,93
22	R\$ 33.300,32	17.532,84	15.767,48
23	R\$ 36.399,47	96.895,11	-60.495,64
24	R\$ 39.787,05	20.952,32	18.834,73
25	R\$ 43.489,90	107.875,62	-64.385,72
Total	R\$ 455.570,91	894.386,41	-438.815,50

FONTE: AUTORES (2016).

Baseado nos dados apresentados na TABELA 07 gerou-se a análise de retorno de investimento dos SFI's, que podem ser visualizados através do GRÁFICO 04.

O retorno de investimentos dos SFI's ocorreria se os saldos acumulados entre a energia produzida por estes e a energia comprada da concessionária, cortasse o eixo das abscissas de baixo para cima, o que não ocorreu. Pode-se concluir que os SFI's não proporcionarão retorno dos valores investidos, portanto economicamente é viável conectar as luminárias analisadas diretamente na rede da concessionária.

GRÁFICO 04 – RETORNO DE INVESTIMENTOS DOS SFI'S.



FONTE: AUTORES (2016).

Análise de custos da energia gerada pelo SFCR

Uma vez que os SFI's são economicamente inviáveis, analisou-se a alternativa de transformar os SFI's em SFCR, comparando os custos de manutenção e investimentos da alteração com a amortização na fatura de energia.

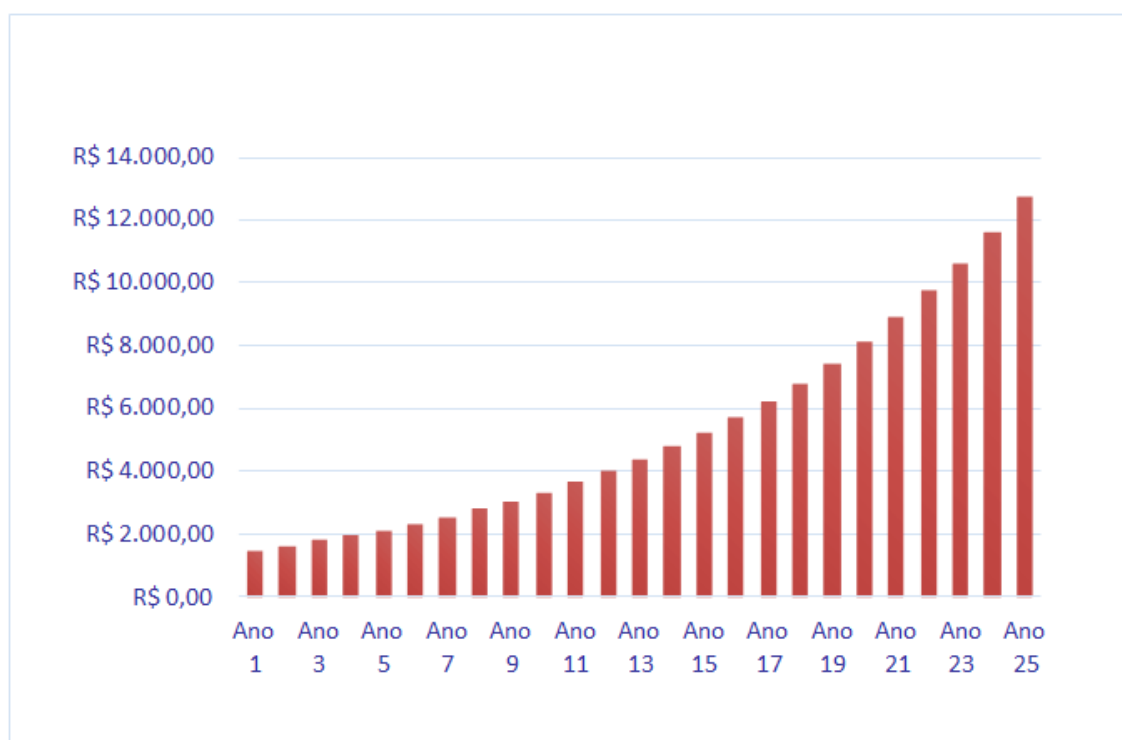
TABELA 08 – CUSTOS DE MANUTENÇÃO DO SFCR.

ITEM	DESCRIÇÃO	UNID.	QTD	PREÇO	TOTAL
01	Limpeza das placas (4 vezes por ano)	h	20	50,00	1.000,00
02	Inspeção conexões elétricas	h	10	50,00	500,00
	Total	-	-	-	1.500,00

FONTE: AUTORES (2016).

Considerou-se que os módulos fotovoltaicos possuem vida útil de 25 anos, portanto o custo da manutenção preventiva de R\$ 1.500,00/ano foi anualmente reajustado baseado na média do INCC no período de 1995 a 2016 apresentados no GRÁFICO 01, resultando nos custos anuais apresentados no GRÁFICO 05.

GRÁFICO 05 – CUSTOS DE MANUTENÇÃO DO SFCR.



FONTE: AUTORES (2016).

Na TABELA 09 foram orçados os equipamentos e materiais necessários para transformar os SFI's em SFCR, exceto o item 08 que representa os módulos fotovoltaicos que podem ser aproveitados dos SFI's existentes. Para transformar os SFI's em SFCR estimou-se um investimento no valor de R\$ 38.091,19.

TABELA 09 – ALTERAÇÃO DOS SFI'S EM SFCR.

ITEM	DESCRIÇÃO	UNID.	QT D	VALOR UNIT. (R\$)	VALOR TOTAL (R\$)
01	Duto Corrugado PEAD 1.1/4" Cinza	m	250	5,50	1.375,00
02	Cabo de cobre # 3x1,5 mm ² , 1 kV, 120°C	m	250	5,00	1.250,00
03	Relógio medidor bidirecional	pç	1	350,00	350,00
04	Inversor de frequência CC para CA	pç	1	10.708,00	10.708,00
05	Fontes de chaveamento eletrônico CA/CC	pç	68	50,00	3.400,00
06	Interruptor DPS 40 kA	pç	4	180,00	720,00
07	Suportes das placas fotovoltaicas	pç	68	100,00	6.800,00
08	Módulo das Placas fotovoltaicas	pç	68	0,00	0,00
09	Quadro de proteção CC	pç	1	1.500,00	1.500,00
10	Projeto, ART, Descritivo elétrico	pç	1	8.680,00	8.680,00
11	Sistema de Aterramento SPDA	pç	1	1.058,19	1.058,19
12	Mão de Obra Instalação	h	45	50,00	2.250,00
	Total				38.091,19

FONTE: AUTORES (2016).

Devido à variação de tarifa de energia da concessionária para diferentes horários, estimou-se a quantidade de energia gerada e a amortização na fatura de energia para os horários da ponta e fora da ponta.

Conforme informado na fatura de energia da referida Universidade, a demanda e o consumo de energia elétrica fora do horário da ponta são de aproximadamente 500 kW e 120.000 kWh/mês, respectivamente. Em contrapartida, a potência de pico dos 68 módulos fotovoltaicos somados é de 6,8 kW e com capacidade de gerar aproximadamente 800 kWh/mês no mês de maior geração. Logo, a capacidade de geração representa 0,6% do total da energia consumida e a potência de pico dos módulos fotovoltaicos representa 1,36% da demanda medida. Com base nessas informações, estima-se que toda energia elétrica gerada será consumida dentro da própria unidade geradora, sem que seja injetada na rede da concessionária. Sendo assim, como não haverá compensação, não será necessário o uso do fator de reajuste, nem a cobrança de ICMS e os demais impostos.

Durante o horário de verão, ou seja, de outubro a fevereiro, em média o nascer do Sol ocorre às 6h53min e o pôr do Sol às 20h19min. Consequentemente, há insolação durante 806 minutos, sendo 727 minutos fora do horário da ponta (22h às 19h do dia seguinte) e 79 minutos no horário da ponta (das 19h às 22h), o que corresponde respectivamente a 90,20% e 9,80%.

Considerando que o período de horário de verão tem duração média de 4 meses por ano, a energia gerada no período será de 3.238,55 kWh ou 765,01 kWh/mês, o que corresponde a uma amortização de R\$ 1.979,50 neste período.

No horário de inverno, em média o nascer do Sol ocorre às 6h51min e o pôr do Sol às 18h21min. Sendo assim, há insolação durante 690 minutos, sendo 669 minutos fora do horário da ponta (das 22h às 19h do dia seguinte) e 21 minutos no horário da ponta (das 18h às 21h), que corresponde respectivamente a 96,96% e 3,04%. A energia gerada neste período será de 5.324,36 kWh ou 671,13 kWh/mês, o que corresponde a uma amortização de R\$ 3.074,51 no período.

TABELA 10 – ESTIMATIVA DE AMORTIZAÇÃO NA FATURA DE ENERGIA.

Horários	Geração		Tarifa (R\$/kWh)	Economia (R\$/mês)	Amortização anual		
	kWh/mês	%			Energia (kWh)	Economia (R\$)	
Verão	Ponta	74,97	9,80	1,637617	122,77	3.238,55	1.979,50
	Fora ponta	690,04	90,2	0,539252	372,10		
Inverno	Ponta	20,40	3,04	1,637617	33,41	5.324,36	3.074,51
	Fora ponta	650,73	96,9	0,539252	350,91		
Total						8.562,92	5.054,01

FONTE: AUTORES (2017).

Em concordância com a TABELA 10, a energia elétrica gerada será de 8,56 MWh/ano, sendo 463,08 kWh no horário da ponta, o que é equivalente a 5,41%, e 8.099,89 kWh no horário fora da ponta, o que é similar a 94,59%. Esta geração de energia elétrica proporcionará uma amortização anual de R\$ 5.054,01 na fatura.

Estimou-se o custo unitário da energia gerada pelo SFCR, a partir do somatório do custo de alteração dos SFI's em SFCR e o custo de manutenção anual, dividido pela quantidade de energia elétrica gerada.

Com base na TABELA 11, calculou-se o custo unitário médio da energia elétrica gerada pelo SFCR em 25 anos, que foi obtido através da divisão pela média da coluna do custo unitário médio de todos os anos, chegando ao valor de R\$ 877,72/MWh.

Na coluna da energia gerada, no primeiro ano usou-se a quantidade total de energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos, conforme apresentado na TABELA 04. Porém nos anos seguintes foi calculada a energia elétrica gerada considerando a perda de desempenho de 0,71% ao ano.

TABELA 11 – CUSTOS DA ENERGIA GERADA PELO SFCR.

ANO	CUSTOS DE MANUTENÇÃO (R\$)	CUSTOS DE ALTERAÇÃO (R\$)	ENERGIA GERADA (MWh)	CUSTO UNITÁRIO (R\$/MWh)	CUSTO ANUAL (R\$)
01	1.500,00	38.091,19	8,56	R\$ 4.625,14	39.591,19
02	1.639,76	0,00	8,50	R\$ 192,93	1.639,76
03	1.792,55	0,00	8,44	R\$ 212,42	1.792,55
04	1.959,57	0,00	8,38	R\$ 233,87	1.959,57
05	2.142,16	0,00	8,32	R\$ 257,49	2.142,16
06	2.341,75	0,00	8,26	R\$ 283,49	2.341,75
07	2.559,95	0,00	8,20	R\$ 312,12	2.559,95
08	2.798,47	0,00	8,14	R\$ 343,64	2.798,47
09	3.059,22	0,00	8,09	R\$ 378,35	3.059,22
10	3.344,26	0,00	8,03	R\$ 416,56	3.344,26
11	3.655,87	0,00	7,97	R\$ 458,63	3.655,87
12	3.996,51	0,00	7,91	R\$ 504,95	3.996,51
13	4.368,88	0,00	7,86	R\$ 555,94	4.368,88
14	4.775,96	0,00	7,80	R\$ 612,09	4.775,96
15	5.220,96	0,00	7,75	R\$ 673,91	5.220,96
16	5.707,42	0,00	7,69	R\$ 741,97	5.707,42
17	6.239,22	0,00	7,64	R\$ 816,90	6.239,22
18	6.820,56	0,00	7,58	R\$ 899,40	6.820,56
19	7.456,07	0,00	7,53	R\$ 990,23	7.456,07
20	8.150,79	0,00	7,48	R\$ 1.090,24	8.150,79
21	8.910,25	0,00	7,42	R\$ 1.200,34	8.910,25
22	9.740,47	0,00	7,37	R\$ 1.321,57	9.740,47
23	10.648,04	0,00	7,32	R\$ 1.455,04	10.648,04
24	11.640,18	0,00	7,27	R\$ 1.601,99	11.640,18
25	12.724,76	0,00	7,21	R\$ 1.763,78	12.724,76

Total	133.193,63	38.091,19	196,72	R\$ 1.942,97	171.284,82
-------	------------	-----------	--------	--------------	------------

FONTE: AUTORES (2016).

A TABELA 12 apresenta o saldo entre o custo de energia da concessionária (considerando as luminárias conectadas à rede) e o custo de manutenção do SFCR.

TABELA 12 – SALDO ENTRE A ENERGIA DA CONCESSIONÁRIA E DO SFCR.

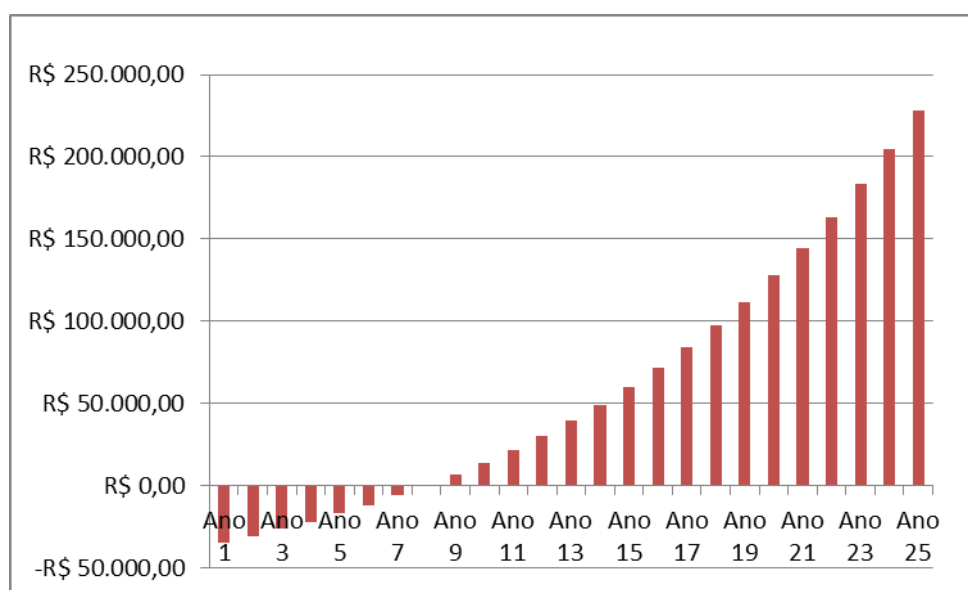
ANO	AMORTIZAÇÃO ENERGIA CONCESSIONÁRIA - (R\$)	CUSTO ANUAL SFCR - (R\$)	SALDO ENTRE O CUSTO DAS FONTES - (R\$)	SALDO ACUMULADO - (R\$)
1	R\$ 5.054,01	39.591,19	-R\$ 34.537,18	-R\$ 34.537,18
2	R\$ 5.485,15	1.639,76	R\$ 3.845,38	-R\$ 30.691,80
3	R\$ 5.953,06	1.792,55	R\$ 4.160,51	-R\$ 26.531,28
4	R\$ 6.460,89	1.959,57	R\$ 4.501,32	-R\$ 22.029,96
5	R\$ 7.012,05	2.142,16	R\$ 4.869,89	-R\$ 17.160,07
6	R\$ 7.610,22	2.341,75	R\$ 5.268,46	-R\$ 11.891,61
7	R\$ 8.259,41	2.559,95	R\$ 5.699,47	-R\$ 6.192,14
8	R\$ 8.963,99	2.798,47	R\$ 6.165,52	-R\$ 26,62
9	R\$ 9.728,67	3.059,22	R\$ 6.669,45	R\$ 6.642,83
10	R\$ 10.558,58	3.344,26	R\$ 7.214,32	R\$ 13.857,15
11	R\$ 11.459,29	3.655,87	R\$ 7.803,43	R\$ 21.660,57
12	R\$ 12.436,84	3.996,51	R\$ 8.440,33	R\$ 30.100,91
13	R\$ 13.497,78	4.368,88	R\$ 9.128,89	R\$ 39.229,80
14	R\$ 14.649,22	4.775,96	R\$ 9.873,26	R\$ 49.103,06
15	R\$ 15.898,88	5.220,96	R\$ 10.677,92	R\$ 59.780,98
16	R\$ 17.255,15	5.707,42	R\$ 11.547,72	R\$ 71.328,70
17	R\$ 18.727,12	6.239,22	R\$ 12.487,90	R\$ 83.816,60
18	R\$ 20.324,65	6.820,56	R\$ 13.504,09	R\$ 97.320,69
19	R\$ 22.058,46	7.456,07	R\$ 14.602,39	R\$ 111.923,08
20	R\$ 23.940,18	8.150,79	R\$ 15.789,39	R\$ 127.712,47
21	R\$ 25.982,42	8.910,25	R\$ 17.072,17	R\$ 144.784,64
22	R\$ 28.198,87	9.740,47	R\$ 18.458,41	R\$ 163.243,05

23	R\$ 30.604,40	10.648,04	R\$ 19.956,36	R\$ 183.199,41
24	R\$ 33.215,14	11.640,18	R\$ 21.574,96	R\$ 204.774,37
25	R\$ 36.048,59	12.724,76	R\$ 23.323,83	R\$ 228.098,20
Total	R\$ 399.383,02	171.284,82	R\$ 228.098,20	-

FONTE: AUTORES (2016).

Caso seja realizada a transformação dos SFI's em SFCR, ao invés de apenas interligar as luminárias na rede da concessionária, haverá uma economia aos cofres públicos de R\$ 228.098,20 em 25 anos. Além disso, o SFCR proposto estimou-se produzir 196,72 MWh, em contrapartida a energia aproveitada pelas luminárias alimentadas pelos SFI's é de 122,25 MWh.

GRÁFICO 06 – RETORNO DE INVESTIMENTOS DO SFCR.



FONTE: AUTORES (2016).

O GRÁFICO 06 demonstra que a alteração dos SFI's em SFCR traria um retorno do valor investido em 9 anos. Segundo Landeira (2013), para SFCR's de até 75 kWp, atendidos na tarifa A4, instalados em regiões favoráveis a geração e utilizando linhas de crédito destinadas ao fomento de tecnologia, podem apresentar um *payback* médio de 20 anos. Tal análise leva em consideração todo o investimento realizado para construção e operação do sistema. A diferença entre os *paybacks* justifica-se devido a este estudo de caso considerar: a alteração dos SFI's em SFCR utilizando recursos próprios; aproveitamento das placas

fotovoltaicas existentes, ou seja, um investimento inicial menor; a isenção no pagamento do ICMS por não injetar energia elétrica na rede.

Custos da energia da concessionária

A TABELA 13 apresenta uma projeção das tarifas de energia elétrica da concessionária local para um período de 25 anos, nos horários dentro e fora da ponta. Estas foram anualmente corrigidas de acordo com a média dos reajustes da COPEL apresentados no GRÁFICO 02.

A partir dos dados apresentados calculou-se a média das tarifas de energia elétrica da concessionária fora do horário da ponta em 25 anos, resultando em R\$ 1.912,23/MWh. Analogamente calculou-se o custo unitário médio de R\$ 877,72/MWh da energia elétrica gerada pelo SFCR baseado nos dados apresentados na TABELA 11. Portanto, o sistema proposto para este estudo de caso, produzirá energia com custo unitário 54,09% inferior a tarifa da concessionária no período denominado horário fora da ponta.

TABELA 13 – TARIFAS REAJUSTADAS DA CONCESSIONÁRIA.

ANO	TARIFA DA CONCESSIONÁRIA FORA DA PONTA - (R\$/MWH)	TARIFA DA CONCESSIONÁRIA NA PONTA - (R\$/MWH)
01	539,25	1.637,62
02	589,44	1.790,02
03	644,30	1.956,62
04	704,26	2.138,71
05	769,80	2.337,75
06	841,44	2.555,32
07	919,75	2.793,14
08	1.005,35	3.053,09
09	1.098,92	3.337,23
10	1.201,19	3.647,81
11	1.312,98	3.987,30
12	1.435,18	4.358,39
13	1.568,74	4.764,01
14	1.714,74	5.207,38
15	1.874,33	5.692,01
16	2.048,76	6.221,75
17	2.239,43	6.800,78
18	2.447,85	7.433,71
19	2.675,66	8.125,54
20	2.924,68	8.881,76
21	3.196,87	9.708,35
22	3.494,39	10.611,88
23	3.819,60	11.599,49
24	4.175,08	12.679,02
25	4.563,64	13.859,01
Média	1.912,23	5.807,11

FONTE: AUTORES (2016).

Comparativo de custos unitários de energia

A TABELA 14 compara os custos unitários da energia elétrica das diferentes fontes apresentadas em 25 anos.

TABELA 14 – COMPARATIVO ENTRE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA.

DIFERENTES FONTES DE ENERGIA	CUSTO UNITÁRIO MÉDIO EM 25 ANOS (R\$/MWH)
Energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos existentes (SFI's).	7.316,04
Alimentação das luminárias deste estudo de caso diretamente da concessionária, do pôr do Sol até às 24h, ou seja, sem geração própria pela unidade consumidora.	3.726,55
Tarifa de energia elétrica da concessionária fora do horário da ponta.	1.912,23
Energia gerada pelo SFCR com alteração dos SFI's (energia gerada e consumida instantaneamente). É a proposta deste trabalho.	877,72

FONTE: AUTORES (2016).

Analisando os dados apresentados na TABELA 14 observa-se que os SFI's possuem o maior custo unitário de energia elétrica gerada, em média R\$ 7.316,04/MWh, seguido pelo custo unitário da energia comprada da concessionária no valor de R\$ 3.726,55/MWh, relativo aos horários de funcionamento das luminárias. Na sequência, fica a compra de energia elétrica da concessionária nos horários fora da ponta, com a tarifa média de R\$ 1.912,23/MWh. Os menores custos unitários de energia elétrica, no valor de R\$ 877,72/MWh, são provenientes do SFCR, que produzirá energia predominantemente fora do horário da ponta.

Considerações finais

Para alterar os SFI's em SFCR, foi estimado um investimento de R\$ 38.091,19 e retorno de investimentos estimado em 9 anos. Em contrapartida os SFI's não apresentaram retorno do valor investido.

A estimativa de gastos com a manutenção dos SFI's e SFCR em 25 anos, acumulada será de R\$ 894.386,41 e R\$ 133.193,63 respectivamente. Essa diferença é devida principalmente à troca periódica das baterias dos SFI's. Para os módulos fotovoltaicos foi estimada uma capacidade de geração de 8,56 MWh/ano. Com o SFCR, toda energia produzida, excluindo as perdas de transporte e transformação será aproveitada. Para os SFI's, o aproveitamento de energia fica restrito ao consumo dos equipamentos conectados a cada unidade geradora, estimou-se que a energia útil seja de 4,89 MWh/ano.

Utilizando os dados comparativos entre manter os SFI's e alimentar as luminárias diretamente na rede da concessionária, estimou-se que os SFI's trarão um gasto adicional de R\$ 438.815,50. Para o mesmo período, com a alteração em SFCR, foi estimada uma economia de R\$ 228.098,20 em relação à energia comprada da concessionária.

O custo unitário da energia elétrica dos SFI's apresentou elevados valores quando comparados à energia adquirida da concessionária. Em contrapartida, o custo unitário do SFCR apresentou os menores valores dentre as fontes analisadas.

Referências

ALONSO, M. C.; GARCÍA, F. S.; SILVA, J. P. **Programa de capacitação em energias renováveis**, ONDI (OBSERVATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA A AMÉRICA LATINA E CARIBE), 2013. Energia Solar Fotovoltaica.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Caderno temático da micro e minigeração**, Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>. Acesso em agosto de 2016.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em junho de 2017.

COPEL. **Sistema de faturamento e compensação de energia elétrica de micro/minigeradores.** Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/inf_fat_micro_gd/\\$FILE/Informa%C3%A7%C3%B5es%20de%20Faturamento_Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/inf_fat_micro_gd/$FILE/Informa%C3%A7%C3%B5es%20de%20Faturamento_Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o.pdf)>. Acesso em junho de 2016.

APINE – Associação Brasileira dos Produtores Independentes de Energia Elétrica. **Agenda Legislativa dos PIEs 2017 V11.1.** Disponível em: <<http://www.apine.com.br/nis/anexos/2017/NI988a02.pdf>>. Acesso em julho de 2018.

CRESESB - **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica,** 2006. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em novembro de 2016.

DEMONTI, R. **Processamento da energia elétrica proveniente de módulos fotovoltaicos,** tese (doutorado em engenharia elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro, 2012.

FORTES, M. Z.; FERREIRA, V. H. **Conceitos iniciais para dimensionamento sistema fotovoltaico em residências,** Introdução a Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.

IEA – **Internactional Energy Agency,** 2014. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em junho de 2016.

LANDEIRA, Juan Lourenço Fandino, 2013. **Análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil.** Universidade

Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Dissertação de mestrado.

MAMEDE, F. J. **Instalações elétricas industriais**, 7ª ed. 914 p., Editora LTC, 2007.

OSTERWALD, C. R.; ANDERBERG, A.; RUMMEL, S.; OTTOSON, L. **Degradation analysis of weathered crystalline-silicon PV modules**. In: Proceedings of the 29 th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA, 2002.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, Grupo de trabalho de energia solar – GTES, CEPEL, DTE, CRESESB; Edição revisada e atualizada, Rio de Janeiro, Março 2014.

PORTAL BRASIL. Disponível em: < <https://www.portalbrasil.net/incc.htm>>. Acesso em maio de 2016.

XIAMEN SOLAR FIRST ENERGY TECHNOLOGY CO. LTD (2016). **Solar First**. Disponível em: <<http://www.esolarfirst.com>>. Acesso maio de 2016.

ZÊNITE. Nascer e ocaso. **Astronomia no Zênite, o Universo é tudo para nós**. Disponível em: <<http://www.zenite.nu/nascer-e-ocaso/>>. Acesso em junho de 2016.