

ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM UNIDADES PROSSUMIDORAS DO SUL DE SANTA CATARINA

COMPLEMENTARITY ANALYSIS BETWEEN PHOTOVOLTAIC AND SOLAR WATER HEATING SYSTEMS IN PROSUMERS IN SOUTHERN OF SANTA CATARINA

Ana Júlia de Lima Santos¹ 

Letícia Toreti Scarabelot² 

Giuliano Arns Rampinelli³ 

Resumo: A energia solar pode ser convertida em energia térmica, utilizada no aquecimento de água através de coletores solares, ou em energia elétrica, por meio de sistemas fotovoltaicos. Visto que o chuveiro elétrico representa uma parcela significativa do consumo residencial brasileiro, o uso da energia solar para esta finalidade se justifica pelas suas aplicações. A proposta deste trabalho é analisar a complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água, em termos técnicos (área disponível) e econômicos (custo de implementação), a fim de suprir a demanda de energia elétrica e de água quente para banho de residências do extremo sul catarinense. Foram analisados quatro sistemas fotovoltaicos (análise amostral) instalados nas cidades de Turvo, Criciúma e Meleiro, com potências nominais entre 1,25 e 4,16 kWp. Os sistemas que originalmente supriam toda a demanda de energia elétrica da unidade consumidora foram redimensionados a fim de excluir a demanda energética do chuveiro elétrico, a qual foi projetada para ser atendida por dois métodos diferentes: exclusivamente por um sistema de aquecimento solar de água ou por um sistema de aquecimento híbrido solar/elétrico. Os sistemas híbridos foram dimensionados conforme a norma ABNT NBR 15569, enquanto os sistemas de aquecimento puramente solar foram simulados através do software System Advisor Model (SAM), assim como o redimensionamento dos sistemas fotovoltaicos. Por fim, verificou-se que há área disponível suficiente na maioria dos casos analisados, porém, nas quatro unidades consumidoras observadas, a complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água não é economicamente viável, sendo que a integração única do sistema fotovoltaico se apresenta mais oportuna e atrativa.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos. Aquecimento Solar de Água. Complementaridade. Chuveiro Elétrico.

¹ Eng. de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, anajlimasantos@hotmail.com.

² Eng. Me. Eletricista, Universidade Federal de Santa Catarina, leticia.scarabelot@posgrad.ufsc.br.

³ Prof. Dr. em Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, giuliano.rampinelli@ufsc.br.

Abstract: Solar energy can be converted into thermal energy, which is used to heat water through solar collectors, or to electrical energy through photovoltaic systems. Since the electric shower represents a significant portion of the Brazilian residential consumption, the use of solar energy for this purpose is justified by its applications. The purpose of this paper is to analyze the complementarity between photovoltaic and solar water heating systems, in technical terms (available area) and economical (implementation cost), in order to supply the demand for electricity and hot water for bathing residences of the extreme south of Santa Catarina. Four photovoltaic systems (sample analysis) were installed in the cities of Turvo, Criciúma and Meleiro, with nominal powers between 1.25 and 4.16 kWp. Systems that originally met all of the consumer unit's electrical power requirements have been scaled to exclude the energy demand of the electric shower, which is designed to be met by two different methods: exclusively by a solar water heating system or by a solar/electric hybrid heating system. Hybrid systems were sized according to ABNT NBR 15569, while purely solar heating systems were simulated using the System Advisor Model (SAM) software, as well as the resizing of photovoltaic systems. Finally, it was found that there is sufficient available area in most of the cases analyzed, however, in the four consumer units observed, the complementarity between photovoltaic systems and solar water heating systems is not economically viable, and the unique integration of the photovoltaic system is more timely and attractive.

Keywords: Photovoltaic Systems. Solar water heating. Complementarity. Electric shower.

1 INTRODUÇÃO

O consumo final de energia elétrica no país em 2018 registrou um crescimento de 1,4 %, sendo o setor residencial um dos que mais contribuíram para este aumento em valores absolutos (EPE, 2016). Dentre os usos finais de eletricidade no setor residencial brasileiro, o chuveiro elétrico é o equipamento com maior parcela de consumo de energia elétrica, representando um percentual médio de 24 % do consumo total, seguido do refrigerador e do ar condicionado (ELETROBRÁS, 2007).

O consumo do chuveiro elétrico é bastante variável em função das regiões geográficas, o extenso território brasileiro apresenta uma grande diversidade climática e com isso, os hábitos de consumo de água quente acompanham a variação de temperatura das regiões. A região Sul possui uma média de temperatura baixa durante grande parte do ano, tendo assim o chuveiro como principal consumidor de energia no verão e no inverno, consumindo em média 41 % da energia residencial durante o ano (FEDRIGO et al., 2009).

Outra perspectiva de análise dos usos finais de energia elétrica são as zonas bioclimáticas, cujo mapeamento propõe a divisão do território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima (ABNT, 2003). Segundo Fedrigo, Gonçalves e Lucas (2009), o chuveiro é responsável por 37 % do consumo total no verão e 45 % no inverno em regiões mais frias; e 1 % do total no verão e 6 % no inverno em locais de clima quente e pouca variação ao longo do ano, representando a maior e a menor médias, respectivamente. Já na região mais ao Sul, onde o clima varia de ameno para frio, com estações bem definidas, na qual os sistemas analisados pertencem, o chuveiro elétrico apresenta um consumo de 30 % do consumo total no verão e 36 % no inverno.

O consumo de água quente para o banho e, conseqüentemente, o consumo de energia para aquecer a água ainda é fortemente dependente do comportamento do consumidor. Tal consumo é influenciado por características

econômicas e socioculturais, o que requer um estudo abrangente para caracterizar o perfil de consumo das diversas regiões do país (NASPOLINI; RÜTHER, 2016).

Segundo a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA, 2020), a economia gerada por um sistema de aquecimento solar térmico (SAS) pode chegar a 50 % e, neste contexto, representa uma solução oportuna para o aquecimento de água para banho. Análises econômicas são realizadas tanto para comparar o aquecimento por meio elétrico quanto para aquecedores a GLP (SOUSA; CASCAES; RODRIGUES, 2020).

O Brasil recebe níveis médios de radiação solar superiores aos observados na maioria dos países europeus e com variabilidade sazonal baixa, devido à grande parte do país estar presente na zona tropical (MARTINS; PEREIRA, 2011). Neste contexto, uma alternativa para a redução do consumo causado pelo chuveiro elétrico é a substituição do aquecimento convencional de água por sistemas de aquecimento alimentados por energia solar.

O aproveitamento da energia solar é obtido por efeito fotovoltaico ou térmico. No Brasil, a difusão da geração de energia a partir da energia solar teve destaque na geração de calor (para aquecimento de água) e na geração de eletricidade fotovoltaica. Nesse caso, a geração de eletricidade ocorre de forma distribuída ou centralizada (BNDES, 2018).

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a complementaridade técnica e econômica entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água a partir de uma amostra composta por quatro unidades prossumidoras do extremo sul catarinense.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

A amostra analisada é composta por quatro unidades prossumidoras, das quais duas estão localizadas na cidade de Turvo/SC e as demais em Criciúma/SC e Meleiro/SC. Os SFV instalados estão caracterizados na Tabela 1.

Tabela 1- Características dos sistemas fotovoltaicos instalados.

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
Pot. Instalada (Wp)	1250	2080	3710	4160
Pot. dos módulos (Wp)	250	260	265	260
Nº de Módulos	5	8	14	16
Inclinação	25°	20°	20°	20°
Azimute	60° L	60° O	0° N	30° O \ 30° L

Fonte: a autora.

As unidades prossumidoras foram analisadas com base em dados mensais de geração e consumo de energia elétrica, obtidos durante o período de um ano. A geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos instalados e o consumo das unidades estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Consumo e geração de energia elétrica das unidades prossumidoras (kWh).

	Turvo 1		Turvo 2		Criciúma		Meleiro	
	Consumo	Geração	Consumo	Geração	Consumo	Geração	Consumo	Geração
Jan	321,91	170,91	238,00	250,00	1018,28	482,28	967,82	484,82
Fev	289,81	162,81	257,00	270,00	836,36	435,36	927,94	430,94
Mar	316,12	151,12	284,00	230,00	844,45	467,45	831,68	445,68
Abr	196,89	128,89	225,00	227,00	558,91	346,91	569,02	315,02
Mai	152,16	118,16	233,00	178,00	469,44	360,44	752,85	342,85
Jun	147,72	78,72	230,00	166,00	503,62	211,62	534,26	348,26
Jul	136,23	116,23	276,00	160,00	486,13	377,13	446,26	260,26
Ago	146,26	123,26	229,00	213,00	473,98	360,98	414,50	303,50
Set	157,21	135,21	246,00	219,00	565,26	392,26	444,25	412,25
Out	133,67	103,67	229,00	230,00	476,71	313,71	389,21	268,21
Nov	161,51	161,51	201,00	270,00	542,84	455,84	491,53	362,53
Dez	166,21	140,21	193,00	290,00	527,88	418,88	582,01	523,01

Total 2325,70 1590,7 2841,00 2703,00 7303,86 4622,86 7351,33 4497,33

Fonte: a autora.

Visto que o consumo de água quente para o banho e, conseqüentemente, o consumo de energia para aquecer a água é fortemente dependente do comportamento do consumidor (NASPOLINI; RÜTHER, 2016), os perfis de consumo de água quente das residências foram determinados através de uma pesquisa com os moradores, onde foram coletados dados de potência do chuveiro elétrico utilizado, quantidade e duração dos banhos tomados diariamente por pessoa. Adotou-se a consideração de que durante os meses de inverno o chuveiro elétrico é utilizado na potência máxima, durante os meses de verão, 50 % da potência máxima e nas demais estações, uma potência média entre a utilizada no verão e no inverno. De posse destes dados, foi possível determinar a energia consumida mensalmente para o aquecimento de água em cada unidade, em kWh (Tabela 3).

Tabela 3 – Consumo de energia do chuveiro elétrico (kWh).

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
Jan	58,13	38,75	94,94	116,25
Fev	52,50	35,00	85,75	105,00
Mar	87,19	58,13	142,41	174,38
Abr	84,38	56,25	137,81	168,75
Mai	87,19	58,13	142,41	174,38
Jun	112,50	75,00	183,75	225,00
Jul	116,25	77,50	189,88	232,50
Ago	116,25	77,50	189,88	232,50
Set	84,38	56,25	137,81	168,75
Out	87,19	58,13	142,41	174,38
Nov	84,38	56,25	137,81	168,75
Dez	58,13	38,75	94,94	116,25
Total	1028,44	685,63	1679,78	2056,88

Fonte: a autora.

O redimensionamento dos sistemas fotovoltaicos foi realizado conforme os métodos utilizados para aquecer a água para banho. Nos casos em que a demanda de energia para o aquecimento foi atendida exclusivamente por um sistema de aquecimento solar de água (sem fonte auxiliar), o sistema fotovoltaico original foi redimensionado excluindo-se 100 % da energia consumida pelo chuveiro elétrico. Já na hipótese de adoção de um sistema de aquecimento híbrido solar/elétrico, a energia auxiliar tem origem do próprio sistema fotovoltaico e visto que, a norma NBR 15569 recomenda que 30 % da energia requerida provenha de fonte auxiliar, o redimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado excluindo-se 70 % da energia consumida pelo chuveiro elétrico do consumo original.

Paula, Nascimento e Silva (2016) levantaram dados de consumo de energia elétrica de residências com e sem SAS durante o ano, onde mostrou-se uma redução da ordem de 40 % com a substituição do chuveiro elétrico. Nesse caso as residências com SAS receberam a sugestão de sistemas fotovoltaicos menores. Porém não foi avaliada diferentes tipos de SAS, pois os sistemas são existentes e fazem parte de um programa social.

A fim de considerar possíveis perdas na geração, sombreamento e ineficiências dos sistemas originais, tal redimensionamento foi realizado a partir da produtividade dos sistemas fotovoltaicos instalados.

$$Y = \frac{E_{gerada}}{P_{nominal}} \quad (1)$$

A produtividade (*Yield*) é a razão entre a energia elétrica gerada (kWh) e a potência nominal do sistema fotovoltaico (kWp) (MELLO, 2016).

A partir do valor total de geração anual de energia elétrica e a potência instalada de cada sistema, Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro apresentaram índices de produtividade de 1273, 1300, 1246 e 1081 kWh/kWp, respectivamente. A potência dos sistemas fotovoltaicos redimensionados foi determinada ainda com a equação da produtividade, agora com a razão entre a

energia demandada após a exclusão do consumo do chuveiro elétrico e a produtividade de cada sistema, calculada anteriormente.

Visto que os sistemas fotovoltaicos originais não atendem 100 % do consumo de energia elétrica das residências e sim a uma parcela da energia consumida, a fração de geração dos sistemas originais foi mantida, por questões de comparação. Esta fração pode ser definida pela razão entre a energia anual gerada e a energia anual consumida de cada sistema, onde os valores encontrados foram 0,68, 0,95, 0,63 e 0,61 para Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro, respectivamente. Dessa forma, foi realizada a determinação da potência nominal redimensionada.

$$P_{red} = \left(\frac{E_{dem}}{Y} \right) \times (R_{GC}) \quad (2)$$

onde: P_{red} é a potência nominal redimensionada (kWp); E_{dem} é a energia demandada após a exclusão do consumo do chuveiro elétrico (kWh); Y é a produtividade fotovoltaica (kWh/kWp) e R_{GC} é a razão entre geração e consumo originais.

Após a determinação da potência nominal teórica dos SFV redimensionados, o número de módulos foi obtido por meio de simulação no software SAM, mantendo-se o azimuth, inclinação e potência individual dos módulos originalmente utilizados nos sistemas fotovoltaicos já instalados. Uma vez que o banco de dados do software não possui as cidades onde estão localizadas as amostras, a cidade de Florianópolis/SC, foi utilizada para fins de simulação. Segundo Roversi e Rampinelli (2018), há uma variação espacial da média diária anual da radiação solar de até 5 % devido a pequena variação nas latitudes e longitudes entre as cidades, o que valida a aproximação.

2.2 Sistemas de Aquecimento Solar de Água

O dimensionamento dos sistemas de aquecimento solar foi realizado considerando-se coletores solares certificados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Foram analisados os coletores com maior e menor eficiência: classificação A (rendimento superior a 80,3 %) e E (rendimento entre 52,3 % e 59,3 %), onde foram observados os valores de área coletora, coeficiente de ganho do coletor solar ($F_{r\alpha}$) e coeficiente de perdas (F_{rUL}). Os valores médios encontrados para tais parâmetros estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios de área, $F_{r\alpha}$ e F_{rUL} para coletores solares classe A e E.

	Classe A	Classe E
Área coletora (m ²)	2,56	3,54
$F_{r\alpha}$ (adimensional)	0,728	0,778
F_{rUL} (W/m ² °C)	2,922	9,346

Fonte: a autora.

O dimensionamento dos sistemas de aquecimento solar de água com fonte auxiliar, foi realizado conforme a norma ABNT NBR 15569, a qual estabelece os requisitos para o sistema de aquecimento solar (SAS), considerando aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, instalação e manutenção, onde o fluido de transporte é a água. A norma se aplica ao SAS composto por coletores solares planos e com sistema de aquecimento auxiliar (ABNT, 2008). Nesses sistemas, quando necessário é utilizado outro método para atingir a temperatura desejada, podendo ser um aquecedor elétrico (SOUSA; CASCAES; RODRIGUES, 2020). A fração solar é a parcela de energia requerida para aquecimento de água que é suprida pela energia solar, a metodologia de cálculo empregada na norma considera uma fração solar de 70 % e está representada pelas equações a seguir (Eq. 3 à Eq. 9):

$$V_{consumo} = \sum(Q_{pu} \times T_u \times \text{frequência de uso}) \quad (3)$$

onde, V_{consumo} é o volume de água quente consumido diariamente (m^3); Q_{pu} é a vazão da peça de utilização (m^3/s) e T_u é o tempo médio de uso diário da peça de utilização (s). A Frequência de uso é o número total de utilizações da peça por dia.

O volume de consumo foi calculado variando-se a vazão da peça de utilização (chuveiro), a fim de se obter a energia útil mais aproximada aos valores encontrados através dos dados fornecidos pelos moradores. Ao final, a vazão encontrada foi padrão de 5 L/min ou $8,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ para os quatro sistemas analisados, enquanto que o tempo médio e a frequência de uso foram baseados na pesquisa com os moradores de cada residência.

$$V_{\text{armaz.}} = \frac{V_{\text{consumo}} \times (T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}})}{(T_{\text{armaz.}} - T_{\text{ambiente}})} \quad (4)$$

onde, V_{consumo} é o volume de consumo diário (m^3); $V_{\text{armaz.}}$ é o volume do sistema de armazenamento do SAS (m^3); T_{consumo} é a temperatura de consumo de utilização ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{armaz.}}$ é a temperatura de armazenamento da água ($^{\circ}\text{C}$) e T_{ambiente} é a temperatura ambiente média do local de instalação ($^{\circ}\text{C}$).

O volume de armazenamento foi calculado considerando-se o volume de consumo encontrado anteriormente, a temperatura de consumo e a temperatura de armazenamento sugeridas pela norma (40 $^{\circ}\text{C}$ e 60 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente). Utilizou-se o método do mês crítico, que consiste na realização do dimensionamento considerando um balanço de energia durante o período do ano no qual ocorrem as condições médias mais desfavoráveis para o sistema (PINHO; GALDINO, 2014). A análise dos dados de consumo indicou que o inverno é o período com maior demanda energética e menor disponibilidade de recurso solar, como consequência a temperatura ambiente utilizada foi a média dos meses de junho, julho e agosto (16,9 $^{\circ}\text{C}$), valores coletados na base de dados do *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA).

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{armaz.}} \times \rho \times C_p \times (T_{\text{armaz.}} - T_{\text{ambiente}})}{3600} \quad (5)$$

onde, $E_{\text{útil}}$ é a energia útil (kWh/dia); $V_{\text{armaz.}}$ é o volume do sistema de armazenamento do SAS (m^3); ρ é a massa específica da água igual a $1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; C_p é o calor específico da água igual a $4,18 \text{ (kJ/kg)}$; $T_{\text{armaz.}}$ é a temperatura de armazenamento da água ($^{\circ}\text{C}$) e T_{ambiente} é a temperatura ambiente média do local de instalação ($^{\circ}\text{C}$).

$$E_{\text{perdas}} = 0,15 \times E_{\text{útil}} \quad (6)$$

onde, E_{perdas} é o somatório das perdas térmicas (kWh/dia) e $E_{\text{útil}}$ é a energia útil (kWh/dia).

A energia útil foi calculada considerando-se o volume de armazenamento encontrado anteriormente, massa e calor específicos indicados pela norma e as temperaturas de armazenamento e ambiente já citadas anteriormente ($40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente). Ao final, a energia útil encontrada foi muito próxima aos valores obtidos através da pesquisa com os moradores. Enquanto a energia referente às perdas, foi calculada pela equação indicada pela norma que considera que o somatório das perdas térmicas pode ser aproximado a 15% do valor da energia útil.

$$FC_{\text{instal}} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\text{ótimo}})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (7)$$

onde, FC_{instal} é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar; β é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal ($^{\circ}$); $\beta_{\text{ótimo}}$ é a inclinação ótima do coletor para o local de instalação ($^{\circ}$) e γ é o ângulo de orientação do coletor em relação ao norte geográfico ($^{\circ}$).

O fator de correção foi calculado considerando-se a mesma inclinação (β) e orientação (γ) dos sistemas fotovoltaicos originais e a inclinação ótima

($\beta_{\text{ótimo}}$) foi adotada conforme a sugestão da norma (módulo da latitude local + 10°).

$$PMDEE = 4,901 \times (Fr_{\tau\alpha} - 0,0249 \times Fr_{UL}) \quad (8)$$

onde, PMDEE é a produção média diária de energia do coletor solar (kWh/m²); $Fr_{\tau\alpha}$ é o coeficiente de ganho do coletor solar (adimensional) e Fr_{UL} é o coeficiente de perdas do coletor solar (W/m² °C).

A produção média diária de energia foi calculada considerando-se os valores médios de $Fr_{\tau\alpha}$ e Fr_{UL} dos coletores solares certificados pelo INMETRO.

$$A_{\text{coletora}} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \times FC_{\text{instal}} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad (9)$$

onde, A_{coletora} é a área coletora (m²); $E_{\text{útil}}$ é a energia útil (kWh/dia); E_{perdas} é o somatório das perdas térmicas (kWh/dia); FC_{instal} é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar; PMDEE é a produção média diária de energia do coletor solar (kWh/m²) e I_G é a irradiação global média diária para o local de instalação (kWh/m²dia).

Por fim, a área coletora para os SAS de água com fonte auxiliar foi determinada utilizando-se os valores de energia útil, energia de perdas, fator de correção e produção média diária de energia encontrados anteriormente. A irradiação global média foi obtida através do banco de dados do SWERA, considerando a aproximação das cidades da amostra à Florianópolis (da mesma forma como nos sistemas fotovoltaicos), respeitando a orientação e inclinação de cada sistema. Os valores utilizados foram 3,42, 3,46, 3,89 e 3,75 (kWh/m²dia) para os sistemas Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro possuem, respectivamente.

O dimensionamento dos sistemas de aquecimento solar de água sem fonte auxiliar, onde o consumo de água quente é suprido exclusivamente por um SAS, foi realizado respeitando-se uma fração solar mínima de 90 %, através do software SAM. Para aumentar a fração solar, aumentou-se o

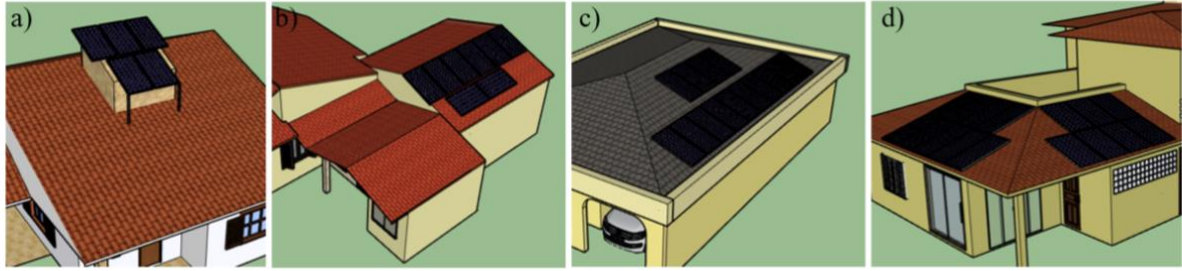
número de coletores solares, até que os sistemas Turvo 1 e Turvo 2 atingiram frações solares de 92 %, Criciúma e Meleiro, 91 %.

No software foram ajustados os valores de volume de consumo, baseado na pesquisa com os moradores e os valores médios de área, F_{rta} e F_{rul} para coletores solares classe A e E. A escolha do volume dos reservatórios térmicos foi feita respeitando-se a recomendação da norma ABNT NBR 15569, a qual estabelece que o volume de armazenamento seja igual ou superior a 75 % do volume de consumo. E considerando o volume dos reservatórios térmicos disponíveis no mercado, os sistemas propostos empregaram reservatórios de 200 litros para os SAS de Turvo e Criciúma e 300 litros para o sistema de Meleiro.

2.3 Análise Técnica

A análise técnica foi feita baseada na área disponível de cada telhado, onde foi considerada apenas a área de mesma orientação de instalação dos sistemas fotovoltaicos originais. Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro possuem, respectivamente, 85 m², 32 m², 52 m² e 50 m² de área disponível. Os sistemas fotovoltaicos originais são compostos por módulos com 1 metro de largura por 1,7 metros de comprimento e ocupam 8,5 m², 13,6 m², 23,8 m² e 27,2 m² nos sistemas Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro, respectivamente. As residências, incluindo os sistemas fotovoltaicos originais, foram representadas através do software SketchUp (Figura 1).

Figura 1 – Representação do SFV, a) Turvo 1, b) Turvo 2, c) Criciúma e d) Meleiro.



Fonte: a autora.

A área necessária para os sistemas fotovoltaicos redimensionados foi estimada considerando-se as mesmas dimensões dos módulos utilizados no sistema original. E a área necessária para os sistemas de aquecimento solar de água foi determinada com base nos coletores solares disponíveis no mercado (1 m², 1,5 m² e 2 m²), em arranjos que mais se aproximassem à área calculada através da norma (para sistemas híbridos) e através do software SAM (para sistemas sem fonte auxiliar), de forma a garantir no mínimo 90 % da área calculada.

2.4 Análise Econômica

A análise econômica foi baseada no custo de instalação dos sistemas. Uma comparação entre o valor do investimento dos sistemas fotovoltaicos já instalados e o custo da complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água, determinou a viabilidade econômica da proposta.

Segundo o estudo do Instituto Ideal em parceria com a AHK-RIO (CHAVES; RÜTHER, 2019), o preço de sistemas fotovoltaicos com potência até 5 kWp, em 2018, na região sul, era de R\$ 5,95 por Wp instalado. Com base neste estudo, foi calculado o investimento dos sistemas já instalados e dos sistemas redimensionados (reduzidos).

O custo de instalação do SAS foi baseado em uma pesquisa de mercado de coletores e reservatórios térmicos da marca Heliotek (Bosch Group), devido à sua certificação pela ABRASOL (Associação Brasileira de Energia Solar Térmica). Foram considerados coletores comerciais de 1 m², 1,5 m² e 2 m² onde os valores médios encontrados foram R\$ 584,50, R\$ 824,50 e R\$ 999,50, respectivamente e a escolha do tamanho do coletor utilizado foi feita buscando maior aproximação à área de projeto. Os valores encontrados para o reservatório térmico de 200 e 300 litros foram R\$ 1499 e R\$ 1619, respectivamente. Ainda foi considerado um valor adicional correspondente a 30 % do valor dos equipamentos, referente aos custos com projeto, instalação e eventuais acessórios.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Sistemas Fotovoltaicos

A partir da exclusão total do consumo do chuveiro elétrico (considerando o caso dos sistemas de aquecimento solar sem fonte auxiliar), os sistemas fotovoltaicos obtiveram uma redução na demanda de energia elétrica de 44 %, 24 %, 23 % e 28 % respectivamente para os sistemas fotovoltaicos Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro. E a partir da exclusão de 70 % do consumo do chuveiro elétrico (considerando o caso dos sistemas de aquecimento solar híbridos solar/elétrico), os SFV obtiveram uma redução na demanda de energia elétrica de 31 %, 17 %, 16 % e 20 % respectivamente para os sistemas fotovoltaicos Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro. Batisti, Marangoni e Zeferino (2018), consideraram que o SAS com fonte auxiliar deve aquecer a água parada na tubulação e ainda atender os períodos chuvosos e/ou períodos em que o reservatório não atingiu a temperatura desejada, dessa forma a redução do consumo de energia elétrica relacionada ao banho, seria de aproximadamente 80 %.

A energia demandada por cada sistema após essa redução está representada na Tabela 5. A partir da demanda de energia reduzida foram calculadas as novas potências dos sistemas fotovoltaicos. Os resultados obtidos para tal redimensionamento, após a adequação no software SAM, estão representados na Tabela 6. Deve-se ressaltar que o sistema Turvo 1 apresentou potências teóricas menores que 1 kWp, tanto na redução do consumo total, como na redução de 70 % do consumo do chuveiro elétrico e para fins de viabilidade técnica e econômica foi considerada uma potência mínima de 1 kWp.

Tabela 5 – Demanda de energia elétrica (kWh).

	Sem o consumo do chuveiro elétrico				Sem 70% do consumo do chuveiro elétrico			
	Turvo	Turvo 2	Criciúma	Meleiro	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
Jan	263,79	199,25	923,34	851,57	281,22	210,88	951,82	886,45
Fev	237,31	222,00	750,61	822,94	253,06	232,50	776,34	854,44
Mar	228,93	225,88	702,04	657,31	255,09	243,31	744,77	709,62
Abr	112,52	168,75	421,10	400,27	137,83	185,63	462,44	450,90
Mai	64,97	174,88	327,03	578,48	91,13	192,31	369,76	630,79
Jun	35,22	155,00	319,87	309,26	68,97	177,50	375,00	376,76
Jul	19,98	198,50	296,26	213,76	54,86	221,75	353,22	283,51
Ago	30,01	151,50	284,11	182,00	64,89	174,75	341,07	251,75
Set	72,84	189,75	427,45	275,50	98,15	206,63	468,79	326,13
Out	46,48	170,88	334,30	214,84	72,64	188,31	377,03	267,15
Nov	77,14	144,75	405,03	322,78	102,45	161,63	446,37	373,41
Dez	108,09	154,25	432,94	465,76	125,52	165,88	461,42	500,64
Total	1297,26	2155,38	5624,08	5294,46	1605,79	2361,06	6128,01	5911,52

Fonte: a autora.

Tabela 6 – Características dos sistemas fotovoltaicos redimensionados.

	Sem o consumo do chuveiro elétrico				Sem 70% do consumo do chuveiro			
	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
Pot. Inst. (Wp)	1000	1560	2920	3120	1000	1820	3180	3640
nº de Módulos	4	6	11	12	4	7	12	14

Fonte: a autora.

3.2 Sistemas de Aquecimento Solar de Água

Foram encontrados diferentes resultados para coletores solares classe A e classe E. Os valores de área coletora encontrados com base na norma ABNT NBR 15569, utilizando-se coletores classe A, foram 2,41 m², 1,62 m², 3,07 m² e 4,04 m² para os sistemas de aquecimento solar de água Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro, respectivamente. Já com os coletores classe E, os valores encontrados foram 2,90 m², 1,95 m², 3,69 m² e 4,85 m², respectivamente, para os mesmos sistemas. Os valores obtidos para todas as equações do dimensionamento via NBR 15569 estão representados nas Tabela 7.

Tabela 7 – Valores obtidos com via norma ABNT 15569.

	Coletores classe A				Coletores classe E			
	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
V _{consumo} (m ³)	0,15	0,10	0,25	0,30	0,15	0,10	0,25	0,30
V _{armaz} (m ³)	0,08	0,05	0,13	0,16	0,08	0,05	0,13	0,16
E _{útil} (kWh/dia)	4,01	2,67	6,55	8,02	4,01	2,67	6,55	8,02
E _{perdas} (kWh/dia)	0,60	0,40	0,98	1,20	0,60	0,40	0,98	1,20
FC _{instal}	1,17	1,20	1,04	1,08	1,17	1,20	1,04	1,08
PMDEE (kWh/m ²)	3,21	3,21	3,21	3,21	2,67	2,67	2,67	2,67
A _{coletora} (m ²)	2,41	1,62	3,07	4,04	2,90	1,95	3,69	4,85

Fonte: a autora.

Percebe-se que os parâmetros que variam para coletores classe A e E são a produção média diária (PMDEE), pois é dependente dos coeficientes de ganho e perda do coletor e, conseqüentemente, a área coletora, pois é função da PMDEE. Fica evidente que coletores menos eficientes, ou seja, com maiores coeficientes de perda, é necessária uma área coletora maior para a geração da energia requerida.

Para o dimensionamento integral do consumo de água quente, através do software SAM, foram encontrados os valores de área coletora listados na Tabela 8. Há um aumento considerável dos valores em relação à metodologia

empregada na NBR 15569, devido à maior fração solar aplicada ao dimensionamento, visto que o aumento da fração solar implica na diminuição do desempenho térmico do SAS e, conseqüentemente, na diminuição da eficiência global do sistema. Ainda é possível perceber que ao utilizar coletores classe E, ou seja, menos eficientes, a demanda de área coletora é superior à área necessária com coletores classe A, assim como no dimensionamento via norma.

Tabela 8 – Área coletora necessária (m²) – Software SAM.

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
Coletor Classe A	10,24	7,68	12,80	12,80
Coletor Classe E	24,78	14,16	35,40	31,86

Fonte: a autora.

3.3 Análise Técnica

As áreas obtidas para os sistemas fotovoltaicos redimensionados estão representadas na Tabela 9. Os resultados estão considerando sistemas fotovoltaicos complementares a sistemas de aquecimento solar de água sem fonte auxiliar e com fonte auxiliar elétrica.

Tabela 9 – Área dos sistemas fotovoltaicos redimensionados (m²).

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
SAS sem fonte auxiliar	6,80	10,20	18,70	20,40
SAS com fonte auxiliar	6,80	11,90	20,40	23,80

Fonte: a autora.

As áreas dos sistemas de aquecimento solar de água obtidas por meio de arranjos com coletores de dimensões comerciais estão representadas na Tabela 10. A tabela seguinte, descreve os arranjos utilizados. Os resultados estão expressos em função de sistemas sem fonte auxiliar e com fonte auxiliar (sistemas híbridos).

Tabela 10 – Área dos sistemas de aquecimento solar de água (m²) e arranjos dos sistemas, expresso pelo número de coletores x área individual do coletor (m²).

	Área dos sistemas (m ²)				n° de coletores x área individual (m ²)			
	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
SAS sem fonte auxiliar								
Classe A	10,00	8,00	13,00	13,00	5x2	8x1	13x1	13x1
Classe E	24,00	14,00	36,00	32,00	12x2	7x2	18x2	16x2
SAS com fonte auxiliar								
Classe A	3,00	1,50	3,00	4,00	2x1,5	1x1,5	2x1,5	2x2
Classe E	3,00	2,00	4,00	5,00	2x1,5	1x2	2x2	5x1

Fonte: a autora.

Ao final, com a combinação da área necessária pelos sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar, obteve-se a área total demandada pela complementaridade entre os sistemas. A Tabela 11 apresenta a área total encontrada.

Tabela 11 – Área total necessária (m²).

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
SAS Sem fonte auxiliar + Sistema FV				
Classe A	16,80	18,20	31,70	33,40
Classe E	30,80	24,20	54,70	52,40
SAS Com fonte auxiliar + Sistema FV				
Classe A	9,80	13,40	23,40	27,80
Classe E	9,80	13,90	24,40	28,80

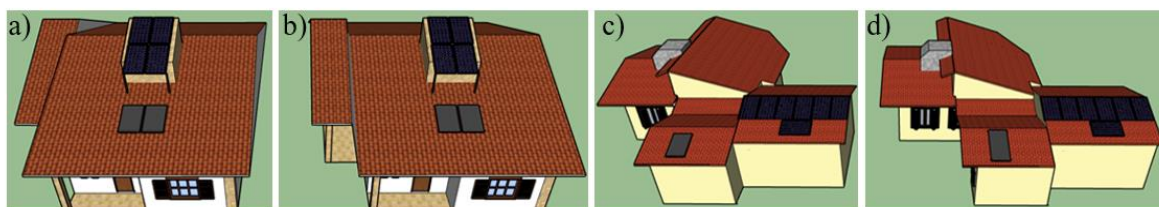
Fonte: a autora.

Ao comparar os resultados com a área disponível do telhado de cada sistema, nota-se que há área suficiente na maioria dos casos, exceto para os sistemas de Criciúma e Meleiro, utilizando-se SAS sem fonte auxiliar e coletores classe E. Ambos os sistemas apresentaram valores de área necessária 5 % superior à área disponível. O sistema Turvo 2, apesar de apresentar área suficiente para os sistemas complementares, não possui uma geometria adequada para a instalação do sistema fotovoltaico redimensionado

e o SAS de água sem fonte auxiliar, utilizando coletores classe E. A mesma limitação ocorre no sistema de Meleiro, com coletores classe A.

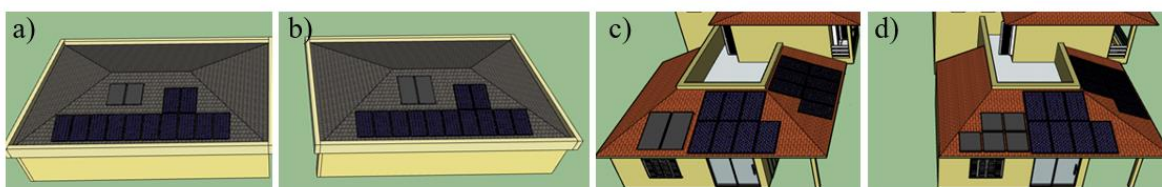
Os sistemas com fonte auxiliar possuem as menores demandas por área e estão representados nas Figuras 2 e 3. Os sistemas sem fonte auxiliar, que possuem área suficiente e geometria adequada, estão representados nas Figura 4.

Figura 2 – Representação do sistema complementar. Turvo 1: Com fonte auxiliar considerando a) coletor classe A e b) coletor classe E. Turvo 2: Com fonte auxiliar considerando c) coletor classe A e d) coletor classe E.



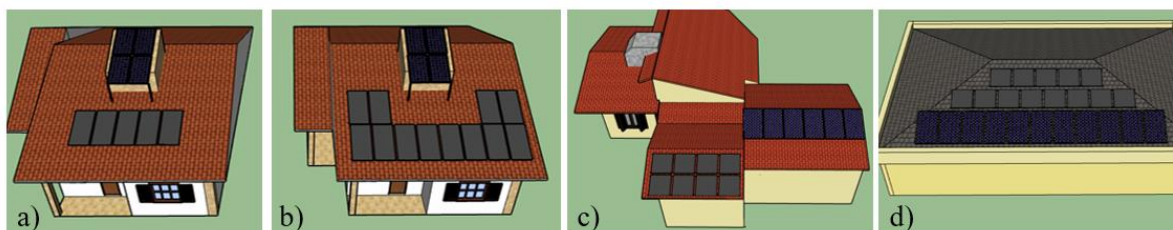
Fonte: a autora.

Figura 3 – Representação do sistema complementar. Criciúma: Com fonte auxiliar considerando a) coletor classe A e b) coletor classe E. Meleiro: Com fonte auxiliar considerando c) coletor classe A e d) coletor classe E.



Fonte: a autora.

Figura 4 – Representação do sistema complementar. Turvo 1: Sem fonte auxiliar considerando a) coletor classe A, b) coletor classe E, c) Turvo 2: Sem fonte auxiliar considerando coletor classe A e d) Criciúma: Sem fonte auxiliar considerando coletor classe A.



Fonte: a autora.

Cada um dos quatro sistemas foi analisado em função de quatro hipóteses: sistemas sem fonte auxiliar com coletor classe A, sem fonte auxiliar com coletor classe E, com fonte auxiliar com coletor classe A e com fonte auxiliar com coletor classe E. Destes dezesseis casos analisados, quatro apresentaram alguma limitação técnica, seja por área insuficiente ou geometria do telhado inadequada para a instalação dos sistemas complementares.

3.3 Análise Econômica

Considerando a potência dos sistemas fotovoltaicos, estimou-se o valor do investimento para os sistemas originais e para os sistemas redimensionados. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 12. É possível perceber uma redução do custo de instalação dos sistemas fotovoltaicos redimensionados, em relação aos sistemas originais, de 25 % para os sistemas Turvo 2 e Meleiro, com o uso de SAS sem fonte auxiliar e 12,5 % com o uso de SAS com fonte auxiliar, representando os maiores e os menores percentuais de redução da amostra.

Tabela 12 – Custo dos sistemas fotovoltaicos (R\$).

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
	Originais			
	7437,50	12376,00	22074,50	24752,00
	Redimensionados			
SAS sem fonte auxiliar	5950,00	9282,00	17374,00	18564,00
SAS com fonte auxiliar	5950,00	10829,00	18921,00	21658,00

Fonte: a autora.

O custo de instalação dos SAS de água está representado na Tabela 13. Os resultados indicaram que há um aumento médio de 88 % com a utilização de coletores classe E, em relação à utilização de coletores classe A, para SAS sem fonte auxiliar. Para SAS com fonte auxiliar este valor é bem menos expressivo, cerca de 11 % em média.

Tabela 13 – Custo dos sistemas de aquecimento solar de água (R\$) e Custo total dos sistemas complementares (R\$).

	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro	Turvo 1	Turvo 2	Criciúma	Meleiro
	SAS sem fonte auxiliar				SAS sem fonte auxiliar + Sistema FV			
Classe A	8445,45	8027,50	11826,75	11982,75	14395,45	17309,50	29200,75	30546,75
Classe E	17540,90	11044,15	25337,00	22894,30	23490,90	20326,15	42711,00	41458,30
	SAS com fonte auxiliar				SAS com fonte auxiliar + Sistema FV			
Classe A	4092,40	3020,55	4092,40	4703,40	10042,40	13849,55	23013,40	26361,40
Classe E	4092,40	3248,05	4547,40	5903,95	10042,40	14077,05	23468,40	27561,95

Fonte: a autora.

A proposta de complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água foi analisada economicamente observando-se o custo com a instalação dos sistemas fotovoltaicos redimensionados, adicionado o custo de instalação dos SAS de água. A Tabela 13 apresenta o custo total de instalação dos sistemas complementares, em função de coletores classe A e classe E. Outro estudo mostra a comparação do retorno de investimento dos sistemas fotovoltaicos para residências com e sem SAS, sendo que as residências com SAS apresentaram um tempo maior, uma vez que o custo de instalação do kWp passa a ser maior (PAULA; NASCIMENTO; SILVA, 2016).

Por fim, ao comparar o custo dos sistemas fotovoltaicos originais com o custo da proposta formada pelos sistemas fotovoltaicos redimensionados e os sistemas de aquecimento solar de água, obteve-se um aumento do valor de investimento, com base na Tabela 15, de 94 %, 40 %, 32 % e 23 % para as unidades Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro, respectivamente, considerando coletores classe A e SAS sem fonte auxiliar de energia. Para coletores classe E, estes valores de investimento aumentam para 216 %, 64 %, 93 % e 67 %.

A proposta de complementaridade com sistemas híbridos de aquecimento apresentou as menores variações do valor de investimento em relação aos sistemas fotovoltaicos originais. Para coletores classe A, o aumento do valor de investimento foi de 35 %, 12 %, 4 % e 7 %, para os sistemas de Turvo 1, Turvo 2, Criciúma e Meleiro, respectivamente. Já com coletores classe E, estes valores foram de 35 %, 14 %, 6 % e 11 %, respectivamente para os mesmos sistemas.

Adicionalmente ainda existem custos como adequação da infraestrutura das residências para receberem o SAS, como por exemplo tubulações, reforma na alvenaria e revestimento cerâmico (BATISTI; MARANGONI; ZEFERINO, 2018).

Em resumo, os resultados da pesquisa mostraram que em alguns casos há viabilidade técnica. Porém, em todas as situações e configurações, o sistema complementar se mostrou menos atrativo economicamente em comparação ao sistema fotovoltaico original.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a análise da complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água, em termos técnicos e econômicos. Enquanto a análise técnica apresentou resultados de viabilidade variável entre as hipóteses analisadas, todos os resultados obtidos na análise econômica indicaram menor atratividade da proposta.

As quatro unidades analisadas apresentaram área suficiente para a implementação dos sistemas complementares, seja utilizando-se coletores classe A, ou coletores classe E. Já nos casos em que os sistemas de aquecimento solar de água não possuíam fonte auxiliar, surgiram limitações técnicas em alguns sistemas, como área disponível insuficiente ou geometria do telhado incompatível com a instalação do arranjo dos sistemas complementares. O sistema de Meleiro obteve o resultado mais desfavorável dentre as amostras, apresentando as duas limitações, o que impossibilitou a implementação da complementaridade entre o sistema fotovoltaico e o sistema de aquecimento solar sem fonte auxiliar.

Ao realizar a análise econômica da complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água é percebido que há um aumento dos custos com a aplicação simultânea dos sistemas, tanto para a hipótese de sistemas de aquecimento solar sem fonte auxiliar, como para sistemas híbridos. O maior aumento registrado foi de 216 % para sistemas de aquecimento sem fonte auxiliar e com o uso de coletores classe E, no sistema Turvo 1, o que indica que há um maior impacto nos sistemas com menor potência e maior participação do chuveiro elétrico no consumo total de energia elétrica. Ainda se destaca a influência da classificação dos coletores no custo final do projeto, visto que coletores menos eficientes demandam de áreas maiores para gerar a energia prevista e, conseqüentemente, de um investimento maior.

Ainda que em alguns casos seja tecnicamente viável, o uso complementar de sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água esbarra na questão econômica. Portanto, para o suprimento de energia elétrica e água quente de uma mesma unidade consumidora, o uso de apenas sistemas fotovoltaicos se mostrou mais oportuno e atrativo.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações. **Associação**

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.5, n.8, p. 303-01, 303-26, 2020
DOI: 10.21575/25254782rmetg2020vol5n81361

Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ABNT. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2008.

ABRAVA. Conheça as vantagens de utilizar a energia solar para aquecer água. **Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento**, 2020.

BATISTI, F.; MARANGONI, F.; ZEFERINO, C. L. Análise da viabilidade para instalação de um sistema de aquecimento solar de água para banho em um hotel na cidade de Medianeira-PR. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

BNDES. A energia solar no Brasil. **Banco Nacional do Desenvolvimento**, 2018.

CHAVES, N.; RÜTHER, R. O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída FV - Edição 2019. **Instituto Ideal**, 2019.

ELETROBRÁS. Pesquisa de Posse de Materiais e Hábitos de Uso - Ano Base 2005, Classe Residencial - Relatório Brasil. **PROCEL**, 2007.

EPE. **Balanco energético nacional, 2016. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, Brazil.** Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese do Relatório Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 1 maio. 2017.

FEDRIGO, N. S. et al. Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2009.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4378–4390, 1 jul. 2011.

NASPOLINI, H. F.; RÜTHER, R. The effect of measurement time resolution on the peak time power demand reduction potential of domestic solar hot water systems. **Renewable Energy**, v. 88, p. 325–332, 1 abr. 2016.

PAULA, N. S.; NASCIMENTO, O. C. S.; SILVA, S. B. Análise de viabilidade da energia solar fotovoltaica conectado à rede, aplicado a residenciais populares: estudo de caso em Itumbiara-GO. **XIV CEEL**, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

SOUSA, M. N. DE; CASCAES, B. P.; RODRIGUES, L. J. Análise econômica e dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água utilizando o programa TRNSYS para pequena cervejaria de Porto Alegre. **VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2020.

Enviado em: 13 jul. 2020.

Aceito em: 18 dez. 2020.

Editores responsáveis: Marcelo Lisboa Rocha

Mateus das Neves Gomes.

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.5, n.8, p. 303-01, 303-26, 2020
DOI: 10.21575/25254782rmetg2020vol5n81361