

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Gabriela Flores Merten

**Estudo comparativo entre os sistemas solar térmico e fotovoltaico para
aquecimento de água residencial**

Araranguá, SC

2023

Gabriela Flores Merten

Estudo comparativo entre os sistemas solar térmico e fotovoltaico para aquecimento de água residencial

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Energia.

Orientador: Prof. Fernando Henrique Milanese, Dr. Eng.

Araranguá

2023

Gabriela Flores Merten

Estudo comparativo entre os sistemas solar térmico e fotovoltaico para aquecimento de água residencial

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Fernando Henrique Milanese, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leonardo Elizeire Bremermann, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Carla De Abreu D'aquino, Dra.
Coordenação do Curso

Prof. Fernando Henrique Milanese, Dr. Eng.
Orientador

Gabriela Flores Merten
Autora

Araranguá, 03 de julho de 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Merten, Gabriela Flores

Estudo comparativo entre os sistemas solar térmico e
fotovoltaico para aquecimento de água residencial /
Gabriela Flores Merten ; orientador, Fernando Henrique
Milanese, 2023.

44 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. energia solar. 3.
aquecimento de água residencial. I. Milanese, Fernando
Henrique. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Dedico este trabalho à minha família,
especialmente ao meu avô Arlindo Merten,
que sempre acreditou no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Sergio e Jeanete, por todo o suporte ao longo da minha graduação, por sempre me incentivarem a persistir e por todo amor e carinho que sempre tiveram comigo. Sem eles, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu namorado Maurício, que me incentiva, e à família dele, por todo o carinho, suporte e compreensão durante a fase final da minha graduação, principalmente durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos da graduação, em especial à Daniela, à Isabel, à Jessica e ao Painho pela parceria nos estudos e por todos os momentos que passamos juntos durante a graduação. Por se tornarem minha família em Araranguá e me motivarem a seguir em frente.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando pela paciência, disponibilidade, apoio e compreensão durante a elaboração deste trabalho. Por toda a mentoria durante a graduação e por proporcionar a oportunidade para que eu fosse monitora de Mecânica dos Fluidos, que foi fundamental para o meu desenvolvimento.

A todos os professores que contribuíram para minha formação. Aos técnicos, servidores e demais funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina que são fundamentais para o funcionamento da universidade.

A todos que fizeram parte da minha jornada e proporcionaram trocas para o meu desenvolvimento.

RESUMO

Existe uma crescente comercialização dos sistemas de energia solar em residências, tanto de sistemas fotovoltaicos quanto de sistemas de aquecimento solar. Porém, as informações técnicas e comerciais ainda são contraditórias sobre os benefícios de cada um destes sistemas. Diante disto, o presente trabalho faz um comparativo entre o sistema de aquecimento solar e o sistema fotovoltaico, visando analisar a viabilidade técnica e econômica de cada um. As premissas básicas para o dimensionamento dos sistemas são: o perfil de consumo da classe residencial e os hábitos de uso de equipamentos. Foi escolhida uma residência típica com quatro moradores, localizada na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. O sistema de aquecimento solar foi dimensionado de acordo com as normas da ABNT e o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado no software SAM (*System Advisor Model*). A análise de viabilidade econômica do sistema fotovoltaico foi realizada de acordo com o estabelecido pela Lei 14.300/2022, e apresentou menor tempo de retorno do investimento quando comparado ao sistema de aquecimento solar. Contudo, ambos os sistemas apresentam viabilidade e benefícios distintos, que são abordados neste trabalho.

Palavras-chave: energia solar; sistema de aquecimento solar; fotovoltaico.

ABSTRACT

There is a growing commercialization of solar energy systems in buildings, including both photovoltaic systems and solar heating systems. However, technical and commercial information regarding the benefits of each system are still contradictory. This study provides a comparison between solar heating systems and photovoltaic systems, aiming to analyze the technical and economic viability of each one. As basic premises for the sizing of the systems there are: consumption profile of residential households and equipment usage habits. A typical building with four occupants located at Florianópolis, Santa Catarina, was chosen for the study. The solar heating system was dimensioned according to ABNT standards, while the photovoltaic system sizing was conducted using the SAM (System Advisor Model) software. The economic viability analysis of the photovoltaic system was conducted in accordance with the provisions of Law 14.300/2022, and it showed a shorter return on investment compared to the solar heating system. However, both systems demonstrate viability and distinct benefits, which are addressed in this study.

Keywords: solar energy; solar heating system; photovoltaic.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PIS	Programa de Integração Social
PPH	Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos
SAM	System Advisor Model
SAS	Sistema de Aquecimento Solar
SCDE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SFV	Sistema Fotovoltaico
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUSDg	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição aplicável a central geradora

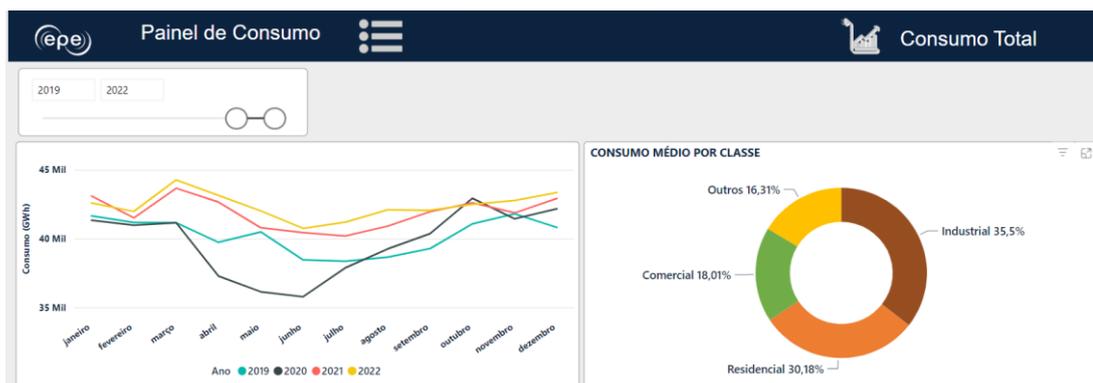
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MARCO LEGAL	17
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
2.3	ENERGIA SOLAR TÉRMICA.....	20
2.4	HÁBITOS DE CONSUMO DO SETOR RESIDENCIAL	22
2.4.1	Consumo de eletricidade	22
2.4.2	Consumo de água quente.....	25
3	METODOLOGIA	28
3.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	29
3.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)	31
3.3	ANÁLISE ECONOMICA.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Entre 2019 e 2022 o setor residencial foi responsável por 30,18% do consumo final de energia elétrica no país (EPE, 2023b). De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2022 – ano base 2021, o consumo residencial de eletricidade no país teve um crescimento de 1,08% (de 148.845 para 150.473 GWh) de 2020 para 2021, sendo que no estado de Santa Catarina esse crescimento foi de 2,53% (de 6.479 para 6.647 GWh). Estima-se que o setor de edificações será responsável por 51% consumo de eletricidade em 2032 (EPE, 2023a). A Figura 1 apresenta o consumo total de energia elétrica no país, em GWh, entre 2019 e 2022 e o consumo médio percentual por classe.

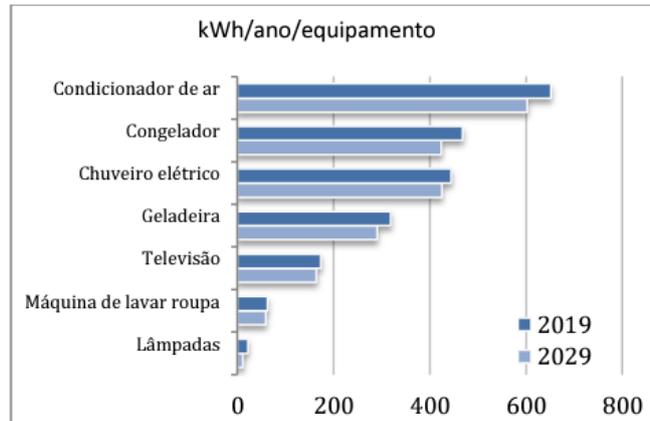
Figura 1 – Consumo de energia entre 2019 e 2022.



Fonte: EPE, 2023b.

Dentre os equipamentos com maior consumo de eletricidade no setor residencial estão os refrigeradores (congeladores e geladeiras), o chuveiro elétrico e os condicionadores de ar. Sendo este último o equipamento que apresenta maior consumo percentual quando utilizado (EPE, 2020). Contudo, apenas 34,56% dos domicílios em Santa Catarina possuem condicionadores de ar, enquanto 100% possuem refrigeradores e 97,60% possuem chuveiro elétrico (ELETROBRAS, 2020). A Figura 2 apresenta o consumo médio de eletricidade (em kWh) por equipamento por ano do setor residencial.

Figura 2 – Consumo médio por equipamento

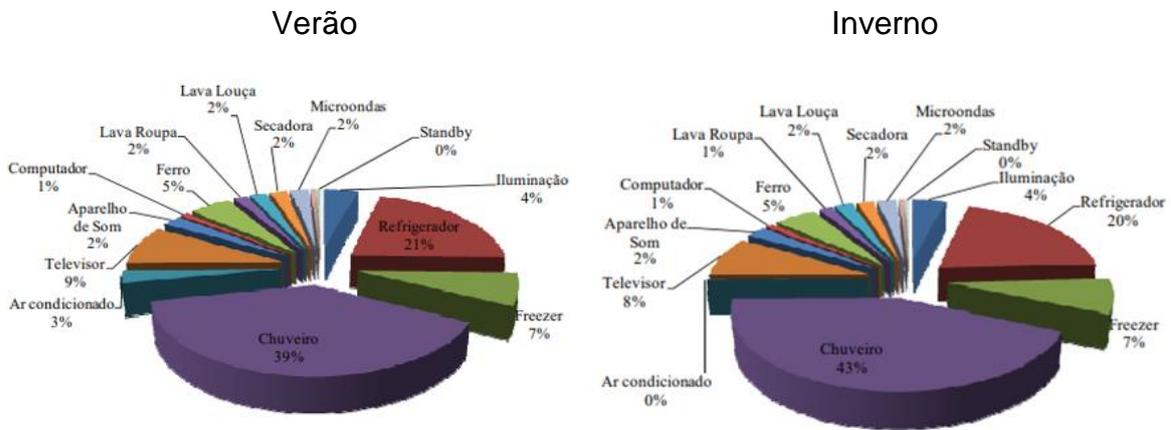


Fonte: EPE, 2020.

O chuveiro elétrico possui uma alta variabilidade no consumo final de eletricidade devido à diversos fatores. Um deles é a região geográfica do país, em razão da vasta extensão territorial do Brasil e sua diversidade climática que fazem com que os hábitos de consumo de água quente variem consideravelmente. Outro fator de impacto representativo é a classe socioeconômica da população e sua influência na posse de outros equipamentos elétricos, que podem ter maior influência no consumo final, como condicionadores de ar. (ELETROBRAS, 2007, 2020).

A região Sul do país possui uma média de temperaturas baixas durante grande parte do ano, apresentando um maior consumo de água quente. O chuveiro elétrico é o principal equipamento no consumo final de eletricidade, representando 39% no verão e 43% do consumo residencial no inverno (FEDRIGO et al., 2009). Na região de Santa Catarina, o consumo do chuveiro elétrico representa 35,67% do consumo final (ELETROBRAS, 2020). A Figura 3 apresenta o percentual de consumo por equipamento na região Sul do país, no verão e no inverno.

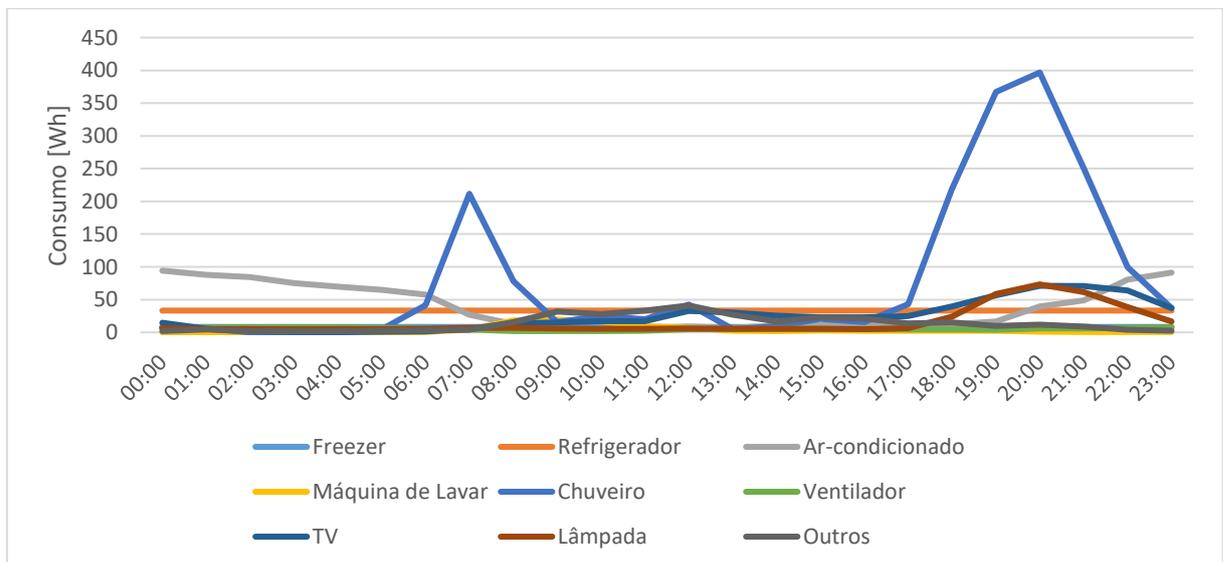
Figura 3 – Percentual de consumo por equipamento na região Sul



Fonte: FEDRIGO et al., 2009.

A utilização do chuveiro elétrico se dá majoritariamente no horário de ponta (ELETROBRAS, 2020). Portanto, é válida a avaliação de alternativas para o aquecimento de água residencial visando tanto a redução no consumo elétrico residencial quanto a sua contribuição para o sistema elétrico brasileiro (SEB). A Figura 4 apresenta a curva de carga do setor residencial no estado de Santa Catarina, por equipamento, na qual observa-se a utilização do chuveiro elétrico majoritariamente entre às 17:00 e 22:00 horas. A Tabela 1 apresenta os valores de consumo em Wh/h por residência dos equipamentos de acordo com os dados obtidos na PPH 2019, os quais foram utilizados para elaboração da curva de carga.

Figura 4 – Curva de carga do setor residencial em Santa Catarina



Fonte: elaborado pela autora com base nos dados de ELETROBRAS, 2020.

Tabela 1 – Consumo horário por equipamento, valores em Wh/h por residência

Horário	Ar- Máquina								
	Freezer	Refrigerador	condicionado	de Lavar	Chuveiro	Ventilador	TV	Lâmpada	Outros
00:00	8,3	33,28	94,25	0,21	6,64	8,04	14,52	6,57	1,82
01:00	8,3	33,28	87,73	0	6,64	7,48	5,32	4,99	4,7
02:00	8,3	33,28	84,18	0	0	7,39	1,99	4,81	1,69
03:00	8,3	33,28	75,08	0	0	7,48	0,46	4,72	1,66
04:00	8,3	33,28	69,8	0	0	7,39	0,32	4,84	1,66
05:00	8,3	33,28	64,76	0	4,27	6,93	0,92	4,94	2,62
06:00	8,3	33,28	57,45	0,42	41,29	6,19	1,7	5,47	2,81
07:00	8,3	33,28	27,12	4,64	211,68	4,25	5,34	7,16	4,16
08:00	8,3	33,28	12,72	18,14	77,84	2,03	13,68	7,09	15,73
09:00	8,3	33,28	5,23	19,41	15,66	2,13	15,44	6,15	32
10:00	8,3	33,28	5,23	16,66	25,15	2,22	17,1	5,65	27,79
11:00	8,3	33,28	5,91	9,28	19,93	2,4	17,11	5,7	33,24
12:00	8,3	33,28	8,9	6,75	42,72	4,9	32,76	5,87	41,09
13:00	8,3	33,28	7,13	2,74	4,75	5,18	30,39	5,23	26,91
14:00	8,3	33,28	10,4	1,9	9,49	5,55	25,21	5,22	16,78
15:00	8,3	33,28	11,39	2,95	20,41	5,45	23,09	5,33	22,87
16:00	8,3	33,28	11,92	2,53	15,66	4,9	23,16	5,13	21,16
17:00	8,3	33,28	11,19	2,74	43,19	4,25	24,91	6,23	13,76
18:00	8,3	33,28	12,52	2,74	218,8	4,44	39,63	23,92	15,04
19:00	8,3	33,28	16,7	2,32	366,88	3,97	56,41	58,62	9,96
20:00	8,3	33,28	39,64	1,06	396,78	5,82	71,04	73,25	11,68
21:00	8,3	33,28	49,04	0,63	250,12	6	70,73	61,63	8,73
22:00	8,3	33,28	80,66	0,63	99,67	6,74	63,91	38,45	4,15
23:00	8,3	33,28	91,12	0,42	37,02	7,58	37,05	16,63	2,46

Fonte: ELETROBRAS, 2020.

Com a crescente popularização dos painéis solares, sejam fotovoltaicos (FV) ou térmicos (SAS), ainda não existem muitos estudos que discorram sobre a sua complementariedade e seus custos-benefícios. O presente estudo apresenta uma modelagem destes sistemas para uma residência unifamiliar com quatro moradores, na região de Florianópolis, Santa Catarina, e sua viabilidade técnica-econômica. São considerados um sistema fotovoltaico para atender o consumo elétrico total da residência, um sistema fotovoltaico para atender apenas o consumo elétrico para aquecimento de água e um sistema de aquecimento solar térmico com sistema de apoio elétrico.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise técnico-econômica do aproveitamento de energia solar para aquecimento de água, fazendo um comparativo entre os sistemas solar fotovoltaico (FV) e solar térmico para aquecimento de água (SAS) residencial. Uma residência unifamiliar composta por quatro pessoas localizada na região de Florianópolis, Santa Catarina, será empregada neste estudo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos são elencados:

- Dimensionamento de um sistema de aquecimento de água por painéis solares térmicos e acessórios com sistema auxiliar elétrico.
- Dimensionamento de dois sistemas fotovoltaicos para acionar aquecedores elétricos para água residencial. Um sistema deve suprir a demanda somente dos aquecedores de água e outro sistema deve suprir toda a demanda de eletricidade da residência.
- Comparação técnico-econômica entre os sistemas propostos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, existe uma crescente comercialização dos sistemas de energia solar em residências, como por exemplo os empregados para aquecimento de água. Uma alternativa é usar painéis solares térmicos agregados a reservatórios termicamente isolados. Outra é o emprego de painéis fotovoltaicos e sistemas de aquecimento de água elétricos. As informações técnicas e comerciais ainda são contraditórias sobre os benefícios de cada um deles, alguns estudos indicam que a complementariedade dos sistemas não apresenta viabilidade técnica-econômica. Contudo, existe uma forte indicação dos comercializadores destes sistemas em relação a instalação de ambos os sistemas. Assim, se faz necessário um estudo comparativo para determinar qual dos sistemas é mais viável para o aquecimento de água residencial, tendo em vista o fato do chuveiro elétrico sozinho ser responsável

por cerca de 30% do consumo final de energia elétrica no setor residencial. Estima-se que o consumo de energia do chuveiro elétrico irá aumentar nos próximos anos devido à aquisição de equipamentos de maior potência (EPE, 2014.), e que o uso do chuveiro elétrico se dá majoritariamente no horário de ponta (ELETROBRAS, 2007, 2020). Com isso, o uso de sistemas de energia solar para aquecimento de água residencial pode trazer benefícios significativos, não só para o consumidor final, como para o setor elétrico como um todo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma revisão bibliográfica referente aos hábitos de consumo do setor residencial e aos sistemas solares em análise. O objetivo é apresentar informações referentes à energia solar fotovoltaica e o sistema de compensação de energia elétrica, à energia solar térmica e aos hábitos de consumo do setor residencial na região Sul do país, mais especificamente no estado de Santa Catarina.

2.1 MARCO LEGAL

Em janeiro de 2022 foi publicada a Lei nº 14.300 que institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o sistema de compensação de energia elétrica (SCDE) e o programa de energia renovável social (PERS). Em fevereiro de 2023 foi publicada a Resolução Normativa da ANEEL nº 1.059, que aprimora as regras para conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuídas, bem como as regras do SCDE. Estas se fazem fundamentais para a análise de viabilidade do sistema fotovoltaico, e representam um grande avanço em termos de regularização do setor.

A geração distribuída foi regulamentada pela ANEEL em abril de 2012 com a publicação da Resolução Normativa nº 482. Desde então, o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e injetar na rede de distribuição o excedente de energia gerada. A publicação desta resolução foi um passo importantíssimo para o desenvolvimento do setor, estabelecendo as definições de e minigeração, e o sistema de compensação de energia elétrica.

A Resolução Normativa nº 482 foi alterada em novembro de 2015 com a publicação da Resolução Normativa nº 687, posteriormente alterada pela Resolução Normativa nº 786/2017, que alteraram os limites de potência instalada de micro e minigeração e as modalidades de participação no SCDE. Se enquadra em microgeração centrais geradoras com até 75 kW de potência instalada e em minigeração centrais geradoras com potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW. Em 7 de dezembro de 2021 ocorreu a publicação da Resolução

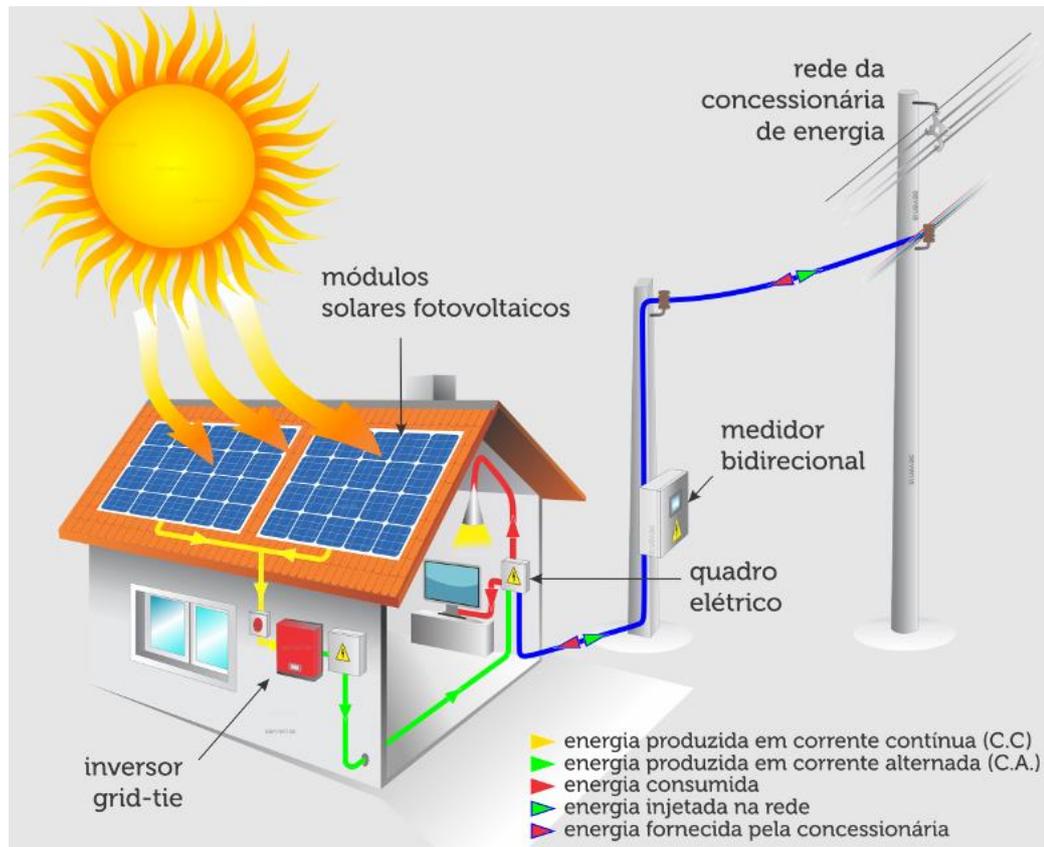
Normativa nº 1.000, que foi aprimorada pela Resolução Normativa nº 1.059 em 2023 para adequações às disposições da Lei nº 14.300 (ANEEL, 2023a).

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida através de células solares fotovoltaicas, que são dispositivos construídos com materiais semicondutores, que fazem a conversão direta da energia solar incidente em eletricidade, denominado efeito fotovoltaico. Essa conversão ocorre de modo silencioso, sem emissão de gases e sem necessidade de um operador para o sistema. O sistema fotovoltaico (SFV) consiste no conjunto de elementos necessários para que essa conversão ocorra, tendo o módulo fotovoltaico como principal componente, podendo incluir dispositivos para controle, supervisão, armazenamento e condicionamento de energia elétrica, dependendo da aplicação. A fiação, estrutura de suporte e fundação, quando necessária, também fazem parte do SFV (LAMBERTS et al., 2010).

Esse sistema pode ser conectado à rede elétrica ou isolado, armazenando a energia em um banco de baterias, dependendo da aplicação desejada. Nos sistemas conectados à rede de distribuição, a energia é injetada diretamente na rede e não há necessidade de um banco de baterias. Os sistemas conectados à rede são constituídos basicamente de módulo fotovoltaico e inversor, como mostra a Figura 5, além dos componentes de comando e proteção como fusíveis, disjuntores, chaves, entre outros (LAMBERTS et al., 2010).

Figura 5 – Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: LUZ SOLAR, 2021.

De acordo com a Resolução Normativa da ANEEL nº 1.059, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCDE) consiste no sistema no qual a energia elétrica ativa é injetada por uma unidade consumidora com microgeração, como uma residência, na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente pode ser utilizada para compensar o consumo de eletricidade de unidades de mesma titularidade participantes do sistema. Esse excedente de eletricidade injetado na rede fica contabilizado como créditos de energia e podem ser utilizados em até 60 meses da geração.

O artigo 655-I dispõe sobre as parcelas a serem pagas à distribuidora por unidades consumidoras faturadas em baixa tensão (grupo B), onde uma parcela é referente à energia ativa consumida da rede de distribuição e a outra é referente à energia ativa injetada na rede, sendo que a parcela referente à energia ativa consumida da rede de distribuição é o maior valor entre os obtidos a partir do custo de disponibilidade da rede ou do faturamento referente à energia consumida da rede, que é composto pela soma da diferença positiva entre o montante de energia

consumida da rede e a energia compensada e do faturamento do custo de transporte da energia compensada, conforme o enquadramento como GD I, GD II ou GD III (ANEEL, 2023b). O custo de disponibilidade da rede é de 30 kWh para ligações monofásicas, 50 kWh para bifásicas e 100 kWh para trifásicas.

De acordo com a Lei nº 14.300/2022, GD I engloba as conexões de mini e microgeração existentes ou solicitadas até 7 de janeiro de 2023, GD III engloba as conexões solicitadas a partir de 8 de janeiro de 2023, com potência instalada acima de 500 kW, em fonte não despachável na modalidade autoconsumo remoto ou na modalidade geração compartilhada, em que um único titular detenha 25% ou mais de participação do excedente de energia, e a GD II engloba as conexões solicitadas a partir de 8 de janeiro de 2023, que não se enquadram nas condições da GD III.

No caso da energia solar fotovoltaica, durante o período do dia a energia é gerada e a energia excedente, que não é utilizada pela unidade consumidora naquele momento, é injetada na rede, podendo ser utilizada quando a demanda de eletricidade da unidade consumidora for maior que a geração, como, por exemplo, durante a noite. A energia que é consumida simultaneamente à geração não é injetada na rede, ou seja, não é faturada pela distribuidora.

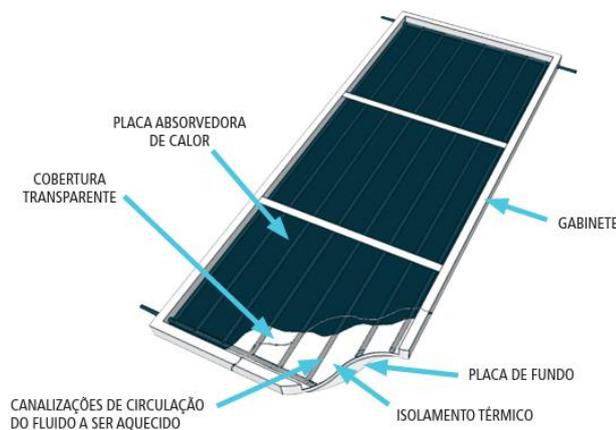
2.3 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

A energia solar térmica consiste na absorção da radiação solar incidente e sua transformação em energia térmica por meio de superfícies projetadas para este fim, permitindo seu uso como fonte de aquecimento de fluidos como a água (SANTOS, 2018). Os sistemas de aquecimento solar de água são basicamente constituídos por coletores solares, reservatório térmico, fonte auxiliar de energia, sistemas de controle e rede de distribuição de água aquecida (LAMBERTS et al., 2010).

O coletor solar é o dispositivo responsável pela captação da energia solar e pela conversão desta em energia térmica. Existem diversos modelos de coletores e, para uso residencial, pode-se utilizar coletores planos, tubos evacuados e sem cobertura, sendo os coletores planos os mais difundidos no mercado brasileiro. Os coletores planos são compostos basicamente por uma placa absorvedora (chapa metálica) com pequenos tubos por onde escoar o fluido, um gabinete isolado termicamente (com lã de vidro, lã de rocha ou poliuretano expandido) e cobertura de vidro. As principais vantagens destes coletores são a simplicidade construtiva,

durabilidade, boa relação de custo para a temperatura desejada e fácil manutenção. Eles podem chegar a temperaturas próximas a 100 °C, dependendo da temperatura ambiente e da radiação incidente, operando bem em temperaturas próximas a 60 °C (LAMBERTS et al., 2010; SANTOS, 2018). A Figura 6 ilustra um coletor solar de placa plana típico e seus principais componentes.

Figura 6 – Exemplo de um coletor solar de placa plana



Fonte: LAMBERTS, 2010.

Quanto ao reservatório térmico, a maioria dos sistemas de aquecimento solar de água para fins residenciais é por acumulação, pois a capacidade de aquecimento das placas coletoras é inferior à demanda instantânea de água quente. Além disso, devido a variação entre o período de consumo e o período de ganho de energia térmica solar, o uso de termoacumulação é praticamente indispensável. O reservatório possui grande influência no custo global, desempenho e confiabilidade do sistema. Alguns fatores que devem ser levados em consideração na escolha do reservatório são o desempenho térmico, volume de água necessário, material de revestimento, qualidade da água disponível, localização, espaço e acessibilidade (LAMBERTS et al., 2010).

Quanto à instalação, pode-se destacar a circulação passiva (termossifão natural), quando a circulação da água ocorre exclusivamente devido a variação do peso específico da água em função de sua temperatura, e a circulação ativa, quando a circulação é forçada através de uma bomba. O sistema pode ser direto, quando o fluido aquecido é o mesmo que será consumido, ou indireto, quando se utiliza um

circuito fechado para o fluido que circula nas placas e um trocador de calor para transferir o calor absorvido para a água (SANTOS, 2018).

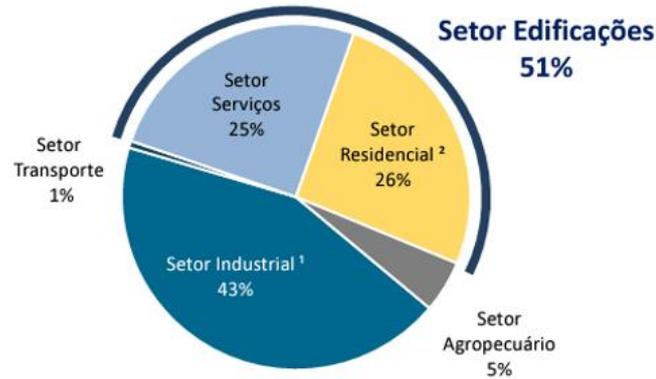
Para que o sistema de aquecimento solar fornecesse toda a demanda de água quente, seria necessário dimensioná-lo considerando o pior cenário possível em termos de disponibilidade de irradiação solar, ficando superdimensionado para a maior parte do tempo de uso, resultando em uma baixa viabilidade econômica. Com isso, as frações solares entre 60 e 80% são usadas com maior frequência. Portanto, se faz necessário a utilização de uma fonte auxiliar de calor para períodos de insolação insuficiente, podendo ser um aquecedor elétrico, a queima de algum combustível ou uma bomba de calor. O aquecedor elétrico é o sistema mais utilizado no Brasil, devido à simplicidade e ao baixo custo (LAMBERTS et al., 2010).

2.4 HÁBITOS DE CONSUMO DO SETOR RESIDENCIAL

2.4.1 Consumo de eletricidade

O consumo de eletricidade no setor residencial brasileiro apresentou um aumento significativo nos últimos anos, passando de 117.646 GWh em 2012 para 150.473 GWh em 2021, o que representa um crescimento de 21,82%. No estado de Santa Catarina o crescimento foi de 29,31% no mesmo período (EPE, 2022b). Em 2021 o setor residencial representou 30,07% do consumo de eletricidade (EPE, 2023b) e a estimativa é de que o consumo de energia nas residências cresça 2% ao ano e em 2032 as edificações sejam responsáveis por 51% do consumo elétrico, podendo contribuir significativamente para os ganhos de eficiência elétrica (EPE, 2020). A Figura 7 apresenta a previsão de participação dos setores no consumo elétrico final para 2032.

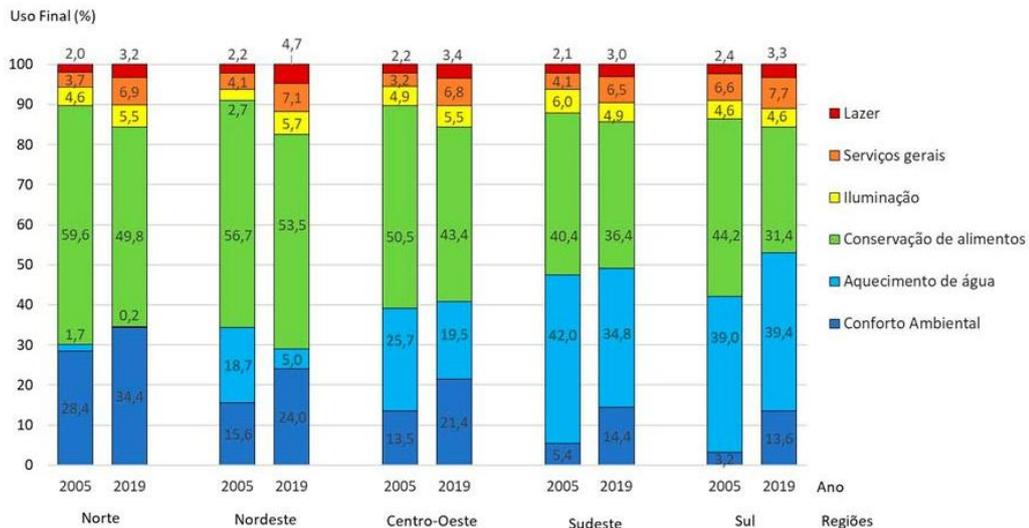
Figura 7 – Participação do consumo elétrico setorial em 2032



Fonte: EPE, 2023a.

Os hábitos de consumo no setor são bastante variáveis, dependendo das regiões geográficas e da classe socioeconômica da população. A principal influência é devida às variações de temperatura e à posse de equipamentos elétricos, respectivamente. Na região Sul do país, por apresentar temperaturas mais baixas durante grande parte do ano, o uso de equipamentos elétricos para aquecimento de água representa uma grande parcela no consumo elétrico final (FEDRIGO et al., 2009). Esta variação fica evidenciada na Figura 8, onde ABRAHÃO e SOUZA (2021) apresentam a estrutura do consumo residencial elétrico por uso final, por categoria de equipamento e por região geográfica de acordo com os dados obtidos pelas PPHs de 2005 e 2019.

Figura 8 – Estrutura do consumo residencial de eletricidade por uso final, por equipamento e por região



Fonte: ABRAHÃO e SOUZA, 2021.

O setor residencial é dinâmico, e o uso final de energia elétrica está associado à posse de equipamentos, à potência, ao tempo e aos hábitos de uso de cada equipamento, e se modifica ao longo do tempo devido às mudanças na renda familiar, às novas tecnologias, às mudanças na cultura de uso, entre outros. (ABRAHÃO e SOUZA, 2021). O Quadro 1 apresenta a média de consumo de energia elétrica mensal dos equipamentos elétricos no inverno e no verão por residência em cada região do país no ano de 2009.

Quadro 1 – Consumo médio mensal de eletricidade por residência

Equipamentos	Consumo médio mensal por residência (kWh/mês)					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	
Iluminação	6,83	3,96	6,87	11,84	8,61	
Refrigerador	36,74	36,11	36,41	39,81	38,92	
Freezer	6,99	8,66	6,83	8,23	21,39	
Chuveiro	Verão	1,89	11,22	15,75	20,13	124,04
	Inverno	0,64	13,02	25,23	90,48	129,16
Ar Condicionado	Verão	18,56	13,99	9,42	7,39	17,05
	Inverno	4,33	2,18	1,95	0,03	0,1
Televisor	11,08	11,49	10,57	15,69	17,28	
Aparelho de Som	2,26	3,01	3,73	5,2	4,73	
Computador	1,16	0,99	2,9	2,99	2,64	
Ferro Elétrico	6,77	6,66	6,74	10,3	9,16	
Lava Roupa	2,25	1,01	2,29	3,39	3,03	
Lava Louça	0,07	0,04	0,22	0,45	5,35	
Secadora	0	0,78	0,14	0,37	6,32	
Forno Microondas	0,86	1,19	3,81	7,67	6,1	
Forno Elétrico	0,01	0,14	0,39	1,2	1,3	
Torneira	0	0	0	1,5	1,13	
Standby	1,04	2,8	1,84	2,19	6,04	
Total no Verão	96,49	102,05	107,91	138,35	273,09	
Total no Inverno	81,02	92,04	109,92	201,34	261,26	

Fonte: FEDRIGO et al., 2009.

A PPH de 2019 traz as curvas de carga da classe residencial por região, por classe econômica e por estado, estas apresentam os valores em Wh/h por residência dos equipamentos: freezer, refrigerador, ar-condicionado, máquina de lavar, chuveiro, ventilador, televisão, lâmpadas e outros. Com estes valores foram calculados o consumo mensal destes equipamentos para o estado de Santa Catarina, os resultados obtidos são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Consumo mensal de eletricidade por equipamento

Equipamento	Consumo (kWh/mês)
Freezer	5,98
Refrigerador	23,96
Ar-condicionado	28,20
Máquina de Lavar	2,89
Chuveiro	57,44
Ventilador	3,86
TV	17,77
Lâmpada	11,21
Outros	9,73
Total	161,03

Fonte: elaborada pela autora com base nos dados de ELETROBRAS, 2020.

Na caracterização dos domicílios da PPH 2019 o número médio de moradores por residência no estado de Santa Catarina foi de 3,22 moradores, sendo assim, para uma residência com quatro moradores o consumo médio mensal de eletricidade é de 200,04 kWh. Este valor resulta em um consumo anual de 2400,47 kWh por residência ou 600,12 kWh por morador, sendo um valor um pouco inferior, mas ainda condizente com o valor apresentado pelo Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 – ano base 2021 (EPE), de 816 kWh/ano por habitante, quando considera-se um aumento de 2% ao ano no consumo residencial.

A PPH 2019 não apresenta dados em relação a torneiras elétricas. O consumo de energia de uma torneira elétrica varia de acordo com a potência e o tempo de utilização, de acordo com dados do INMETRO (2008) a potência das torneiras elétricas varia entre 4400 W e 5500 W. A NBR 15569 apresenta valores sugeridos para o tempo de uso da torneira da pia (cozinha) e do lavatório, os quais serão abordados a seguir.

2.4.2 Consumo de água quente

O consumo de eletricidade para aquecimento de água depende da potência do equipamento e do tempo de uso. A NBR 15569 apresenta valores sugeridos para o consumo diário de água quente, os quais são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores sugeridos para o consumo diário de água quente

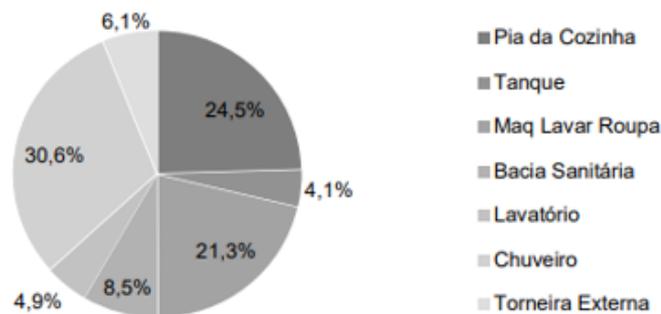
Aparelhos	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minuto/pessoa)	Temperatura de consumo °C
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39 - 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 - 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 - 40
Banheira	80 L	440 L	banho	39 - 40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39 - 40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	lavagem	39 - 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	lavagem	39 - 40

Fonte: ABNT, 2021.

De acordo com Giglio (2015), o consumo médio mensal de água quente proveniente do reservatório térmico é de 17 litros/dia/pessoa, variando de 9,1 litros/dia/pessoa no verão a 31,5 litros/dia/pessoa no inverno, sendo que este resultado é atribuído a um perfil familiar de economizadores de água e energia. Ressalta-se que o consumo de água quente estabelecido por Giglio (2015) considera apenas a utilização de água do reservatório térmico para o chuveiro.

No estudo conduzido por Bertolazzi e Custódio (2020) em uma residência localizada em Joinville, SC com três moradoras, o consumo de água total estimado foi de 12.211,2 litros, representando um volume médio de 145,4 litros/pessoa/dia. As autoras ressaltam que os valores obtidos estão abaixo da média estabelecida para a cidade de 186 litros/pessoa/dia. A Figura 9 apresenta o percentual de consumo final de água por equipamento na residência do estudo.

Figura 9 – Percentual de consumo final de água por equipamento



Fonte: Bertolazzi e Custódio, 2020.

No estudo realizado por Ghisi et al. (2015) em habitações de interesse social na região de Florianópolis, o consumo de água foi de 132 litros/pessoa/dia. De acordo

com o estudo, não existe uma correlação entre o consumo de água e a renda familiar na amostra estudada, sendo que o consumo de água varia de acordo com o tempo de ocupação da residência. O Quadro 4 apresenta os dados obtidos no estudo para o consumo médio de água per capita para as diferentes rendas familiares, sendo a Renda 1 até três salários-mínimos, a Renda 2 de três a cinco salários-mínimos e a Renda 3 acima de cinco salários-mínimos. As médias de consumo de água total foram de 213 litros/habitante/dia, 133,7 litros/habitante/dia e 95,3 litros/habitante/dia, para a renda 1, a renda 2 e a renda 3, respectivamente.

Quadro 4 – Consumo médio de água per capita por uso final

Uso final	Renda 1 (L/hab.dia)			Renda 2 (L/hab.dia)			Renda 3 (L/hab.dia)		
	LI* 90%	Média	LS** 90%	LI* 90%	Média	LS** 90%	LI* 90%	Média	LS** 90%
Chuveiro	58,5	79,4	100,3	33,7	53,7	73,7	27,1	39,7	52,3
Bacia sanitária	37,5	46,0	54,5	19,7	25,4	31,2	11,8	19,5	27,2
Pia	35,0	45,1	55,3	15,1	22,6	30,1	12,9	19,3	25,6
Lavadora de roupas	11,9	23,0	34,0	4,7	20,9	37,0	3,9	7,2	10,5
Lavatório	5,3	7,8	10,4	3,8	7,1	10,4	0	1,0	2,0
Tanque	2,4	6,1	9,8	0,8	2,3	3,9	0,4	0,9	1,4
Outros	1,9	3,3	4,7	0,2	0,5	0,9	1,0	1,9	2,8
Torneira externa	0,7	2,3	3,9	0,1	1,2	2,3	2,3	5,8	9,2

*LI é o limite inferior da média com 90% de confiabilidade; **LS é o limite superior da média com 90% de confiabilidade.

Fonte: Ghisi et al., 2015.

Os estudos revelam que o consumo de água está diretamente relacionado aos hábitos de uso, podendo apresentar uma grande variabilidade. Porém, pode-se observar uma proximidade entre os valores obtidos nos estudos mencionados levando em consideração o consumo médio total da renda 2 no estudo de Ghisi et al. (2015). O Quadro 5 apresenta os valores de litros por pessoa por dia para ducha de banho, lavatório e pia de cozinha, considerando a média entre o consumo mínimo e o consumo máximo estabelecidos pela NBR 15569, e os valores obtidos por Bertolazzi e Custódio (2020) e Ghisi et al. (2015) para renda 2.

Quadro 5 – Uso final de água em litros/pessoa/dia

Uso final	ABNT - NBR 15569	Bertolazzi e Custódio (2020)	Ghisi et al. (2015)
Ducha de banho (L/pessoa/dia)	90,00	44,49	53,70
Lavatório (L/pessoa/dia)	7,80	7,12	7,10
Pia de cozinha (L/pessoa/dia)	14,40	35,62	22,60
Total	112,20	87,23	83,40

Fonte: elaborado pela autora com base nos dados dos estudos.

3 METODOLOGIA

Para simulação e dimensionamento dos sistemas em estudo, primeiramente se faz necessário estipular o perfil de consumo residencial e estabelecer premissas básicas para a simulação do consumo destinado ao aquecimento de água. Para a estimativa do consumo de água será feita uma comparação entre o estabelecido na NBR 15569 e os valores obtidos nos estudos mencionados anteriormente.

O consumo de eletricidade per capita mensal no estado de Santa Catarina é de 74,67 kWh de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 – ano base 2021. Considerando um aumento no consumo de 2% ao ano, para o ano de 2023 este consumo seria de 77,68 kWh/pessoa/mês. Portanto, para uma residência com quatro moradores, o consumo mensal de eletricidade é de 310,7 kWh. Com base nos valores apresentados no Quadro 2 para o consumo mensal de cada equipamento, calculou-se o percentual de consumo destes para estabelecer o consumo por equipamento em uma residência com quatro habitantes para o ano de 2023. Além disso, considerou-se o consumo de duas torneiras elétricas de 5500 W, sendo uma para a pia da cozinha e outra para o lavabo. O consumo mensal de eletricidades das torneiras foi calculado com base nos valores sugeridos pela NBR 15569 para o ciclo diário (minuto/pessoa). Os valores obtidos são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Consumo elétrico mensal por equipamento para o ano de 2023

Equipamento	Consumo (kWh/mês)	Consumo (%)
Freezer	11,53	3,1%
Refrigerador	46,24	12,6%
Ar-condicionado	54,42	14,8%
Máquina de Lavar	5,57	1,5%
Chuveiro	110,84	30,2%
Ventilador	7,45	2,0%
TV	34,28	9,4%
Lâmpada	21,63	5,9%
Outros	18,78	5,1%
Torneira pia	33,46	9,1%
Torneira lavabo	22,31	6,1%
Total	366,50	100%

Fonte: elaborada pela autora.

3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para dimensionamento do sistema fotovoltaico utilizou-se o valor apresentado no Quadro 6 para o consumo elétrico mensal, totalizando 4398 kWh por ano. Para fins de análise, será considerada uma residência com ligação trifásica.

Os sistemas fotovoltaicos foram dimensionados através do software *System Advisor Model* (SAM). O SAM é um software desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL, em inglês) dos Estados Unidos. Os dados de entrada são a localização (Florianópolis), o módulo escolhido, o inversor, o número de módulos por *string*, a quantidade de *strings*, a inclinação dos módulos e o azimute para o qual estão direcionados. O software permite uma série de arranjos e simulações e utiliza de uma ampla base de dados, como o SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), desenvolvida e mantida pelo NREL com colaboração internacional. Com esses dados é feita a simulação dos sistemas fotovoltaicos, retornando a geração de energia (de horária a anual), as perdas do sistema, entre outros.

Primeiramente, foi realizada a simulação do sistema para atender toda a demanda da residência. Para os dimensionamentos, considerou-se que não haveria sombreamento na área instalada. As características do sistema projetado são apresentadas no Quadro 7, e a geração mensal no Quadro 8.

Quadro 7 – Características do sistema fotovoltaico 1

Potência Instalada (Wp)	330
Potência dos módulos (Wp)	3300
Nº de módulos	10
Inclinação	27°
Azimute	0°
Área (m ²)	16,8

Fonte: elaborada pela autora.

Quadro 8 – Geração mensal de energia em kWh/mês do SFV 1

Mês	kWh/mês
janeiro	472,72
fevereiro	412,17
março	482,76
abril	409,31
maio	383,52
junho	336,90
julho	321,36
agosto	391,68
setembro	373,51
outubro	428,21
novembro	437,45
dezembro	451,22
Total [kWh/ano]	4900,81

Fonte: elaborada pela autora.

Comparando os valores do Quadro 6 com o do Quadro 8, pode-se observar que a energia gerada pelo sistema é maior do que a energia consumida estimada, podendo parecer que o sistema ficou superdimensionado. No entanto, essa é uma prática comum considerando-se as perdas de eficiência do sistema com o passar dos anos e um possível aumento no consumo residencial.

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico que visa atender apenas o consumo elétrico relativo ao aquecimento de água (SFV 2), considerou-se apenas o consumo do chuveiro e das torneiras, totalizando 166,6 kWh mensais ou 1999,19 kWh por ano. As características do sistema são apresentadas no Quadro 9 e a geração mensal no Quadro 10.

Quadro 9 – Características do sistema fotovoltaico 2

Potência Instalada (Wp)	330
Potência dos módulos (Wp)	1650
Nº de módulos	5
Inclinação	27°
Azimute	0°
Área (m ²)	8,40

Fonte: elaborada pela autora.

Quadro 10 – Geração mensal de energia em kWh/mês do SFV 2

Mês	kWh/mês
janeiro	232,95
fevereiro	202,97
março	238,33
abril	201,80
maio	188,93
junho	165,69
julho	157,70
agosto	192,87
setembro	183,68
outubro	210,91
novembro	215,44
dezembro	222,04
Total [kWh/ano]	2413,32

Fonte: elaborada pela autora.

O sistema visando atender apenas o consumo elétrico para aquecimento de água foi dimensionada pelo software SAM considerando os mesmos módulos do sistema que atenderá todo o consumo elétrico. Foram necessários cinco módulos para atender a demanda das torneiras e chuveiro, enquanto no sistema para atender todo o consumo elétrico da residência foram necessários dez módulos dispostos em duas *strings*.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)

Com base nos valores apresentados no Quadro 5, fica evidente a dependência do consumo de água com os hábitos de uso. Sendo assim, para o dimensionamento do sistema, optou-se por utilizar valores médios dentre os apresentados, estes são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Uso final de água em litros/pessoa/dia e litros/dia

Uso final	L/pessoa/dia	L/dia
Ducha de banho	62,73	250,92
Lavatório	7,34	29,36
Pia de cozinha	24,21	96,83
Total	94,28	377,11

Fonte: elaborada pela autora.

O dimensionamento do sistema foi realizado seguindo a metodologia de cálculo apresentada na NBR 15569, considerando uma fração solar de 70% e os coletores escolhidos dentre os certificados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade de Tecnologia (INMETRO). Para fins de comparação, simulações foram realizadas considerando coletores classe A e coletores classe C.

Com o volume de consumo estabelecido, considerando a temperatura de consumo de 42 °C, a temperatura ambiente média anual de 20,7 °C e uma temperatura de armazenamento de 50 °C, calcula-se o volume de armazenamento necessário através da Equação (1), chegando em um valor de 274,14 litros/dia.

$$V_{armazenamento} = \frac{V_{consumo} * (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armazenamento} - T_{ambiente})} \quad (1)$$

Após a definição do volume de armazenamento necessário, calcula-se a demanda de energia útil do sistema (kWh/mês), conforme Eq. (2), onde a densidade da água em condições ambientes é $\rho=0,998$ kg/L e o calor específico a pressão constante é $C_p=4,18$ kJ/kg.°C. Com isso calcula-se a área coletora (m^2), conforme Eq. (3), onde E_{perdas} (kWh/mês) é o somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário, calculada pela Eq. (4). FC_{instal} é o fator de correção para a inclinação e orientação do coletor solar, calculado pela Eq. (5), PMEE é a Produção Média Mensal de Energia específica do coletor (kWh/(m^2 .mês)) obtida de acordo com o coletor escolhido, e I_G é o valor da irradiação global média anual diária para o local da instalação (kWh/(m^2 .dia)) obtido através do software SAM com a base de dados SWERA. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 12.

$$E_{\acute{u}til} = \frac{V_{armazenamento} * \rho * C_p * (T_{armazenamento} - T_{ambiente})}{3600} * 30 \text{ dias} \quad (2)$$

$$A_{coletora} = \frac{(E_{\acute{u}til} + E_{perdas}) * FC_{instal}^{*4,89}}{PMEE * I_G} \quad (3)$$

$$E_{perdas} = 0,15 * E_{\acute{u}til} \quad (4)$$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 * 10^{-4} * (\beta - \beta_{\acute{o}timo})^2 + 3,5 * 10^{-5} * \gamma^2]} \quad (5)$$

Onde

β é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, expressa em graus

$\beta_{\text{ótimo}}$ é a inclinação ótima do coletor para o local da instalação, expressa em graus (a NBR 15569 recomenda que seja adotado o valor em módulo da latitude local acrescido de 10°)

γ é o ângulo de orientação dos coletores em relação ao norte geográfico, expresso em graus

Considerando que os coletores estão orientados para o norte, $\gamma=0^\circ$ e $FC_{\text{instal}}=1$.

Quadro 12 – Valores obtidos para o dimensionamento dos SAS

$E_{\text{útil}}$ (kWh/mês)	279,23
E_{perdas} (kWh/mês)	41,89
I_G (kWh/m ² .dia)	3,90
PMEE classe C (kWh/m ² .mês)	69,90
PMEE classe A (kWh/m ² .mês)	90,10
A_{coletora} classe C (m ²)	5,76
A_{coletora} classe A (m ²)	4,47

Fonte: elaborada pela autora.

Com a área coletora definida, foram escolhidos os coletores de acordo com a necessidade do sistema e o custo-benefício. Escolheu-se coletores da marca Heliotek, devido a sua certificação pelo INMETRO e alta disponibilidade no mercado. Para o coletor classe A são necessários 3 coletores do modelo MC2000 TF15, totalizando uma área coletora de 4,5 m², e para o coletor classe C são necessárias 3 placas do modelo MC1300 TF20, totalizando uma área de 6 m². Para o armazenamento foi escolhido um reservatório de 300 litros com apoio elétrico da marca Ribsol, também certificado pelo INMETRO.

3.3 ANÁLISE ECONOMICA

A análise econômica dos sistemas foi baseada no custo de instalação e na economia obtida com cada sistema. Os indicadores econômicos utilizados foram: *payback time*, que representa o tempo de recuperação do investimento; Valor

Presente Líquido (VPL), que a diferença entre os valores de caixa futuros trazidos para o presente e o custo inicial do investimento, ou seja, o retorno em reais obtido; Taxa Interna de Retorno (TIR), que representa a taxa financeira que leva o VPL a zero, refletindo a atratividade do investimento; e Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que corresponde ao percentual mínimo que um investidor de propões a ganhar sendo estimada com base nas principais taxas de juros aplicadas pelo mercado vigente (NUNES, 2022).

Se o VPL calculado for maior que zero, o investimento apresenta viabilidade, caso contrário o projeto é inviável. Em uma situação em que mais de um projeto possui VPL positivo, escolhe-se o de maior valor. A TMA é utilizada no cálculo do VPL e pode ser comparada com a TIR, se a TIR for maior que a TMA, o investimento é atrativo (NUNES, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os custos para cada um dos sistemas analisados, bem como os resultados obtidos com a análise econômica dos sistemas propostos.

Para o sistema fotovoltaico, o módulo escolhido foi o Trina Solar TSM de 330 W e o inversor foi o Growatt MIN de 3800 W de potência. O preço dos sistemas fotovoltaicos para o cliente final em 2023, em média, é de R\$ 4,39 por Wp instalado para sistemas com potência instalada de 4 kWp e de R\$ 5,42 por Wp para sistemas com potência instalada de 2 kWp (Greener, 2023). Este valor considera o preço dos módulos, do inversor e do serviço de integração, sendo utilizado para calcular o custo do sistema fotovoltaico, os valores obtidos são apresentados no Quadro 13. O sistema FV 1 é o projetado para atender todo o consumo da residência e o sistema FV 2 é o que atende apenas o consumo elétrico para aquecimento de água.

Quadro 13 – Custos dos sistemas fotovoltaicos

	Potência instalada (Wp)	R\$/Wp	Total
Sistema FV 1	3300	4,39	R\$ 14.487,00
Sistema FV 2	1650	5,42	R\$ 8.943,00

Fonte: elaborada pela autora.

Para os sistemas de aquecimento solar (classe A e classe C) foi realizada uma cotação no mercado para os coletores e reservatório térmico, e considerou-se um adicional de 30% relativo aos valores dos equipamentos para os custos com projeto, acessórios e instalação (SANTOS, 2019). Os valores obtidos são apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 – Custos dos sistemas de aquecimento solar

Sistema de aquecimento solar	Coletor (un.)	Nº de coletores	Reservatório térmico	Custos extras	Total
SAS classe A (1,5 m²)	R\$ 1.299,00	3	R\$ 2.200,00	R\$ 1.829,10	R\$ 7.926,10
SAS classe C (2 m²)	R\$ 1.432,03	3	R\$ 2.200,00	R\$ 1.948,83	R\$ 8.444,92

Fonte: elaborada pela autora.

Pode-se observar que o valor do sistema fotovoltaico 2 está bem próximo dos valores dos SAS, sendo que o sistema FV atende a demanda anual de consumo para aquecimento de água. Porém, nos meses de junho e julho, a energia gerada é menor

do que a energia consumida pelos equipamentos. Os SAS foram projetados visando atender 70% da demanda de água quente, sendo os outros 30% atendidos por sistemas de apoio elétricos.

Para a análise de viabilidade econômica dos sistemas de aquecimento solar, foi descontado do consumo elétrico da residência os 70% da demanda para aquecimento de água, parcela suprida pelo SAS, restando um consumo mensal de 249,88 kWh. Considerando os valores de tarifas vigentes da CELESC, distribuidora responsável pela região de Florianópolis, foram calculados os custos com eletricidade sem o SAS e com o SAS considerando um ajuste de 6% ao ano nas tarifas, de acordo com o aumento percentual médio dos últimos 8 anos. Estes são apresentados no Quadro 15. O retorno do investimento se dá em 92 meses (7,67 anos) para o SAS classe A e em 100 meses (8,33 anos) para o SAS classe C. Além de ter um *payback* menor, o SAS classe A necessita de uma área menor que o classe C, apresentando maior viabilidade quando considera-se apenas os SAS.

Quadro 15 – Custos com eletricidade anuais com e sem o SAS

	Com SAS	Sem SAS	Economia acumulada
Ano 1	R\$ 2.084,58	R\$ 3.091,81	R\$ 1.007,23
Ano 2	R\$ 2.209,65	R\$ 3.277,31	R\$ 2.074,89
Ano 3	R\$ 2.342,23	R\$ 3.473,95	R\$ 3.206,61
Ano 4	R\$ 2.482,77	R\$ 3.682,39	R\$ 4.406,23
Ano 5	R\$ 2.631,73	R\$ 3.903,33	R\$ 5.677,83
Ano 6	R\$ 2.789,64	R\$ 4.137,53	R\$ 7.025,73
Ano 7	R\$ 2.957,01	R\$ 4.385,78	R\$ 8.454,50
Ano 8	R\$ 3.134,43	R\$ 4.648,93	R\$ 9.969,00

Fonte: elaborada pela autora.

A tarifa de energia elétrica é composta por duas parcelas, a TUSD e a TE. TUSD é a tarifa de uso do sistema de distribuição e TE é a tarifa de energia. No valor final da tarifa ainda incidem os impostos PIS, COFINS e ICMS. As alíquotas de PIS e COFINS variam mensalmente, mas para fins de cálculo foi considerado um valor de 4,08%, que é a média entre a soma das duas alíquotas no período de janeiro de 2019 a maio de 2023. Já a alíquota do ICMS, para a classe residencial, varia de acordo com o consumo, sendo 12% para consumo até 150 kWh e 17% para consumo acima de 150 kWh.

Antes da Lei 14.300/2022, o consumidor que possuísse geração própria conectada à rede (prossumidor), possuía compensação integral sobre todos os componentes da tarifa de energia. Porém, o novo modelo de compensação estabelece o pagamento da TUSD – Fio B, uma parcela da TUSD referente aos custos da utilização da infraestrutura da rede de distribuição. Para consumidores conectados em baixa tensão o pagamento dessa parcela se dará de forma gradual para projetos protocolados entre o 13º e o 18º mês de publicação da Lei (regra de transição), sendo de 15% em 2023 e aumentando 15p.p. ao ano até atingir 90% em 2028, e passando a pagar 100% em 2031. Ou seja, da tarifa de energia compensada, será descontado um percentual da parcela da TUSD fio B. O novo modelo ainda prevê o pagamento referente a uma demanda de geração, dada pela diferença entre injeção na rede e consumo, medidos em kW, multiplicada pela tarifa TUSDg, porém ela não será aplicada em unidades do grupo B por enquanto, devido a necessidade de medidores bidirecionais de demanda.

O fator de simultaneidade, referente ao percentual de energia gerada que é consumida instantaneamente, tem um forte impacto na análise de viabilidade econômica dos projetos fotovoltaicos devido a diferença entre a tarifa de consumo e de energia injetada, na qual não incidem todos os impostos, além da parcela da TUSD fio B que é cobrada pela energia injetada na rede e consumida posteriormente. Para a análise de viabilidade do sistema 1, foi considerado um fator de simultaneidade de 30% (valor padrão para residências), ou seja, 30% da energia total gerada pelo sistema não passará pela rede de distribuição.

Para o sistema 2 foi considerado um fator de simultaneidade de 70%, uma vez que o sistema não atenderá toda a demanda da residência, uma parcela maior da energia gerada será consumida simultaneamente, este valor foi escolhido com base na proximidade do consumo simultâneo em kWh do sistema 1. Também se considerou um aumento de 6% ao ano nas tarifas e um decréscimo de 0,7% na geração de energia devido as perdas indicadas pelo *datasheet* do inversor. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 16, que apresenta também o custo anual com energia nas situações sem e com cada um dos sistemas fotovoltaicos, bem como as economias geradas.

Quadro 16 – Custos de eletricidade com e sem os sistemas fotovoltaicos [R\$]

Período	Sem FV	Com SFV 1	Com SFV 2	Economia acumulada SFV 1	Economia acumulada SFV 2
Ano 1	3.091,81	206,08	1.449,39	2.885,73	1.642,41
Ano 2	3.277,31	274,52	1.562,29	5.888,52	3.357,44
Ano 3	3.473,95	350,83	1.683,23	9.011,65	5.148,16
Ano 4	3.682,39	435,73	1.812,74	12.258,30	7.017,81
Ano 5	3.903,33	530,00	1.951,42	15.631,63	8.969,73

Fonte: elaborada pela autora.

Para o sistema FV 1, o que atende todo o consumo da residência, o retorno do investimento se dá em 56 meses (4,67 anos) enquanto para o sistema FV 2, o *payback* ficou em 60 meses (5 anos). Apesar do investimento inicial ser menor, devido ao fato do sistema não atender toda a demanda da residência, o tempo de retorno acaba sendo mais longo. Os cenários foram calculados considerando um período de bandeira tarifária verde, na vigência de outras bandeiras, o *payback* dos sistemas pode ser ainda menor, devido ao aumento nas tarifas de energia.

Para a análise econômica foi considerada uma TMA de 5,21% obtida pelo valor do Tesouro IPCA+2035, de acordo com o Tesouro Direto (2023) em 21 de junho de 2023, que corresponde ao IPCA+5,21%. Os valores obtidos para os indicadores econômicos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Indicadores Econômicos obtidos para cada sistema

	SAS A	SAS C	SFV 1	SFV 2
VPL	R\$ 1.977,44	R\$ 1.458,62	R\$ 11.937,51	R\$ 6.245,46
TIR	9,65%	8,34%	18,77%	16,90%
Payback time (anos)	7,67	8,33	4,67	5,00

Fonte: elaborada pela autora.

Contudo, a análise econômica mostrou vantagens em ambos os sistemas fotovoltaicos quando comparados aos sistemas de aquecimento solar. Comparando-se os indicadores econômicos obtidos, o sistema mais interessante em termos de investimento, é o fotovoltaico projetado para atender toda a demanda de energia elétrica da residência.

A viabilidade técnica depende ainda da área de telhado disponível para a instalação. Neste trabalho considerou-se que há área disponível para a instalação dos sistemas propostos. Sendo necessários 4,5 m² para o SAS classe A, 6 m² para o SAS classe C, 8,4 m² para o SFV 2 e 16,8 m² para o SFV 1, considerou-se que haveria uma área disponível de pelo menos 17 m².

Devido a necessidade de área para instalação dos sistemas, grande parte dos casos, não apresenta viabilidade técnica para a instalação de um sistema fotovoltaico operando em conjunto com um sistema de aquecimento solar. Todos os sistemas apresentaram VPL positivo e uma TIR maior que a TMA, sendo assim, todos os sistemas apresentam viabilidade econômica. Porém, de acordo com os indicadores calculados neste estudo, os SAS não apresentam um investimento tão atrativo quando os SFV. Apesar disto, os SAS apresentam uma alternativa melhor do ponto de vista da sustentabilidade.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo fazer uma análise comparativa entre os sistemas solar térmico e fotovoltaico, visando atender o consumo de eletricidade geral e o consumo de eletricidade para aquecimento de água de uma residência situada na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Para isso, foram analisados os perfis de consumo de eletricidade e de água quente do setor residencial para estabelecer as premissas necessárias para as modelagens e simulações. Diante dos dados analisados, conclui-se que os hábitos do usuário influenciam diretamente tanto na demanda de água quente, quanto na demanda de eletricidade.

Os resultados obtidos indicam benefícios em cada um dos sistemas propostos, sendo o sistema solar fotovoltaico que atende todo o consumo da residência o que apresentou melhor viabilidade econômica para o consumidor final. O sistema solar fotovoltaico que atende apenas a parcela de consumo destinada ao aquecimento de água se mostrou mais viável economicamente do que o sistema de aquecimento solar, sendo que o sistema fotovoltaico ocupa uma área 1,87 vezes maior.

Contudo, o sistema de aquecimento solar se apresenta como uma alternativa benéfica para o sistema elétrico brasileiro, uma vez que o consumo de eletricidade no horário de ponta no setor residencial se dá majoritariamente pelo uso de chuveiros elétricos. Com o uso do SAS proposto, essa demanda de eletricidade pode ser reduzida em mais de 40%, podendo chegar em uma redução de 60% com um SAS que seja projetado para operar sem sistema de apoio elétrico.

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar uma residência real, considerando a área disponível para a instalação e as oscilações no consumo ao longo do ano. Fazer um levantamento do quantitativo de residências que possuem SAS e que possuem SFV, e sobre conforto térmico da temperatura de banho propiciada por chuveiros elétricos. Também sugere-se avaliar os impactos da cobrança da TUSDg na viabilidade econômica de projetos fotovoltaicos quando comparados aos de aquecimento solar.

REFERÊNCIAS

- ABNT [Associação Brasileira de Normas Técnicas]. **NBR 15569**: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Requisitos de projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2021.
- ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. **Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200532>.
- ALTOÉ, Leandra; OLIVEIRA FILHO, Delly; CARLO, Joyce Correna. **Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar**. Ambiente Construído, [s.l.], v. 12, n. 3, p.75-87, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212012000300006>.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e Minigeração Distribuída**. Brasil, 20 jun. 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 22 jun. 2023.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL No 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021**. Brasil, 7 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.059, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2023**. Brasil, 7 fev. 2023b. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569**: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Requisitos de projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2021.
- BERTOLAZZI, Luísa; CUSTÓDIO, Diego Antônio. **ANÁLISE ECONÔMICA DE SOLUÇÕES PARA REDUZIR O CONSUMO DE ÁGUA POTÁVEL – ESTUDO DE CASO DE UMA RESIDÊNCIA EM JOINVILLE – SC**. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 9, p. 186, 21 fev. 2020. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020186-206>.
- BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 6 jan. 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 14 mar. 2023.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII., 2018, Gramado. **Análise de sistemas de aproveitamento da energia solar para edificações residenciais**. Gramado: CBENS, 2018. Disponível em:

<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/271>. Acesso em: 03 dez. 2022.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005**: Classe Residencial Relatório Sul. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007. 160 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso de equipamentos elétricos na Classe Residencial, PPH - 2019**: Estados, Santa Catarina. Brasil: ELETROBRAS; PROCEL, 2020. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 03 dez. 2022.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 – Ano base 2021**. Rio de Janeiro, 2022a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%20C3%A1rio%20Estat%20C3%ADstico%20de%20Energia%20EI%20C3%A9trica%202022.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021**. Rio de Janeiro, 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2022.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Demanda e eficiência energética**. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Rio de Janeiro, 2023a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Efici%20C3%A4ncia%20e%20Demanda%20-%20PDE%202032%20final_20230313.pdf. Acesso em: 16 mar. 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética], 2014. **Nota Técnica DEA 26/14**. Avaliação da eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023). Rio de Janeiro, 2014.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Painel de monitoramento do consumo de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2023b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 13 mar. 2023

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

FEDRIGO, Natália Sens et al. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. Florianópolis, 2009. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_ic/IC2009_Natalia.pdf. Acesso em: 03 dez. 2022.

- GHISI, Enedir et al. **Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social. Volume 1 – Hábitos e indicadores de consumo de água e energia.** Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Relat%C3%83%C2%B3rio%20FINEP%20-%20VOL%2001.pdf. Acesso em: 05 abr. 2023.
- GIGLIO, Thalita Gorban Ferreira. **Influência do usuário na economia de energia obtida por meio do uso de sistema de aquecimento solar de água em habitações de interesse social.** 2015. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_ThalitaGiglio2.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.
- Greener, 2023. **Estudo estratégico de geração distribuída: Mercado Fotovoltaico.** Brasil, fevereiro de 2023. Disponível em: <https://greener.com.br>. Acesso em: 03 mai. 2023.
- INMETRO [Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia]. **Tabela de Consumo de Energia Elétrica - Torneiras Elétricas.** Edição 01/2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbe8.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2023.
- LAMBERTS, Roberto et al. **Casa Eficiente: consumo e geração de energia.** Florianópolis: UFSC, 2010. 2 v. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_II_WEB.pdf. Acesso em: 08 mai. 2023.
- LUZ SOLAR. **Como funciona o sistema fotovoltaico?** 2021. Disponível em: <https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/>. Acesso em: 21 jun. 2023.
- MATAJS, Roberto Ramos. **Demanda, Consumo e Custo das Alternativas ao Chuveiro Elétrico: O exemplo do Estado de São Paulo.** 1997. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-19012012-100032/pt-br.php>. Acesso em: 04 mar. 2023.
- NUNES, Isabel Bianchini. **Oportunidades para geradores de energia elétrica no âmbito da geração distribuída: um estudo sobre o artigo nº 15 do Marco Legal da GD.** 2022. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243532>. Acesso em: 21 jun. 2023.
- SANTOS, Ana Júlia de Lima. **Análise da complementaridade entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de aquecimento solar de água em unidades prosumidoras do sul de Santa Catarina.** 2019. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/203001>. Acesso em: 05 nov. 2022.

SILVA, A. S. et al. **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*, v. 2, p. 7-18, 2014.

SOUSA, Lays Camila de et al. **Avaliação de um sistema de energia solar térmica para a substituição de chuveiro elétrico numa residência no município de Itajubá, Minas Gerais, Brasil**. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado.

TESOURO DIRETO. **Preços e taxas dos títulos IPCA, Pré e Pós-fixados**. 2023. Disponível em: <https://www.tesourodireto.com.br/titulos/precos-e-taxas.htm#0>. Acesso em: 21 jun. 2023.

TORRES, Regina Célia. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-18032013-091511/publico/dissertacao_final_rct.pdf. Acesso em: 08 abr. 2023.