BENCHMARKING ENERGÉTICO DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

Igor Catão Martins Vaz (1); Matheus Geraldi (2); Renata De Vecchi (3); Ana Paula Melo (4); Roberto Lamberts (5); Enedir Ghisi (6)
(1) M.Eng, Engenharia Civil, igor.catao@posgrad.ufsc.br
(2) Dr., Engenharia Civil, matheus.s.geraldi@gmail.com
(3) Dra., Engenharia Civil, renata.vecchi@posgrad.ufsc.br
(4) Dra., Engenharia Civil, a.p.melo@ufsc.br
(5) PhD, Engenharia Civil, roberto.lamberts@ufsc.br
(6) PhD, Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br
(1-6) Universidade Federal de Santa Catarina – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 88090-400.

RESUMO
O objetivo deste trabalho é realizar um benchmarking (análise comparativa) dos sistemas de aquecimento de água residencial e avaliar a aplicação em diferentes cidades no Brasil. Foram avaliadas as tabelas de eficiência energética para chuveiros elétricos, aquecedores a gás e componentes de aquecimento solar de água disponibilizadas pelo IPT e INMETRO. Os dados dos diferentes aparelhos foram analisados e foram apresentadas discussões sobre como as interpretações podem auxiliar os projetistas na compreensão de qual sistema utilizar e de como compará-los energeticamente. Em seguida, foi realizado o dimensionamento de quatro sistemas de aquecimento de água por meio da metodologia disponibilizada pela Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R), da Portaria nº 309 de 6 de setembro de 2022. Os quatro sistemas considerados foram: chuveiros elétricos, aquecedor a gás de passagem, *boiler* elétrico com acumulação e aquecimento solar com apoio elétrico. Foi escolhida uma unidade habitacional em uma edificação multifamiliar, e avaliado seu uso em doze diferentes cidades brasileiras com zonas bioclimáticas diferentes. Os resultados serviram para comparação do consumo em energia primária com o *benchmarking* energético. O consumo de energia primária variou entre 1599 e 3226 kWh/ano para chuveiros elétricos, e o uso de energia solar supriu entre 24 e 100% da energia para o aquecimento de água. Também se percebe que chuveiros elétricos foram menos impactantes em locais com menor demanda de água quente, como edificações do Norte e Nordeste do país. De modo geral, espera-se auxiliar projetistas acerca das informações disponíveis sobre a eficiência energética do aquecimento de água.

Palavras-chave: água quente, eficiência energética, *benchmarking* energético, habitação de interesse social.

ABSTRACT
The objective of this work is to perform a benchmarking (comparative analysis) of residential water heating systems and to evaluate the application in different cities in Brazil. The energy efficiency tables for electric showers, gas heaters and solar water heating components made available by IPT and INMETRO were evaluated. The data from the different appliances was analysed and discussions were presented on how the interpretations can help designers understand which system to use and how to compare them energetically. Next, the sizing of four water heating systems was performed by means of the methodology made available by the Inmetro Normative Instruction for the Energy Efficiency Rating of Residential Buildings (INI-R), of Ordinance no. 309 of September 6, 2022. The four systems considered were: electric showers, gas water heater, electric boiler with accumulation and solar heating with electric support. A housing unit in a multi-family building was chosen and its use was evaluated in twelve different Brazilian cities with different bioclimatic zones. The results were used to compare primary energy consumption with energy benchmarking. Primary energy consumption varied between 1599 and 3226 kWh/year for electric showers, and the use of solar energy supplied between 24 and 100% of the energy for water heating. One can also perceive that electric showers had less impact in locations with lower hot water demand, such as buildings in the North and Northeast of the country. Overall, one hopes to assist designers with information on the energy efficiency of water heating.

Keywords: hot water, energy efficiency, energy benchmark, social housing.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (UN, 2022a), na última década observaram-se diversos avanços em relação à eficiência energética mundial e ao aumento da produção de energia limpa. Porém, são necessários investimentos mais expressivos nestas medidas para atender a agenda de mudanças estabelecida para 2030. Tais investimentos também devem ser incorporados em modo sistemático, para potencializar os impactos positivos das mudanças. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) também indica os caminhos para a mitigação e adaptação de sistemas de energia em seu mais recente relatório (AR6). Dentre os itens elencados incluem-se energias renováveis, mínimo uso de energias fósseis, eletrificação dos sistemas de edificações e eficiência energética (IPCC, 2022).

Sob o espectro do uso de energia, observam-se diversos avanços no campo da pesquisa sobre a otimização energética. Edificações (públicas, comerciais e residenciais) são responsáveis por aproximadamente 50% do consumo de eletricidade no Brasil (BEN, 2022), e 55% do consumo de eletricidade no mundo (IEA, 2019). Dentre as tipologias existentes, as edificações residenciais são responsáveis pela maior parcela do consumo de eletricidade no Brasil, com aproximadamente 150,73 TWh (BEN, 2022). Entre 2020 e 2021, a energia consumida em edificações de tipologia residencial aumentou em 1,09%, e tal valor corresponde à energia da fase de uso, da qual pode-se detalhar os respectivos consumos para análises de otimização. Ademais, a fase de uso é a principal responsável pelo consumo de energia durante a vida útil de um edifício, o que indica alto potencial de melhorias (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). Também de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), o aumento de investimento global em eficiência energética em 2021 foi de 15%, corroborando com o intuito de diminuir o consumo energético de edificações.

O aquecimento de água é um dos temas de extremo interesse de pesquisadores e consultores para a obtenção de eficiência energética em edificações residenciais no Brasil. Teixeira et al. (2022), por exemplo, avaliaram os perfis de consumo energético regional do Brasil, a partir da última versão da Pesquisa de Posse e Hábitos (PPH) (PNCEE, 2019) realizada pela Eletrobrás no âmbito do Procel. Como resultado relacionado à água quente, os autores obtiveram que o consumo de energia em chuveiros elétricos, para aquecimento, é responsável por 33,8% do total de eletricidade consumida em residências do Sul do país. No Sudeste, esta parcela diminui para 24,0%, e no Centro-Oeste, para 16,5%. Para o Nordeste e Norte os autores obtiveram percentuais inferiores, com cerca de 2,6% e quase nulo, respectivamente. Ou seja, no escopo nacional, em média, 18,9% do consumo de eletricidade está associado aos chuveiros elétricos (TEIXEIRA et al., 2022).

Uma primeira tecnologia para otimização em relação ao uso de chuveiros elétricos é o uso de energia solar para aquecimento de água. Diversos estudos brasileiros foram elaborados sobre a adoção da energia solar como método de aquecimento (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012; SANGOI; GHISI, 2019; VECHI; GHISI, 2018). Outras possibilidades, como o uso de bombas de calor e de materiais de mudança de fase (WILLEM; LIN; LEKOV, 2017), também vêm sendo estudadas, porém não são utilizadas por parcela significativa do mercado devido à complexidade e custos. Por último, Gás Natural (GN) e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) também são possíveis fontes para aquecimento.

Sangoi e Ghisi (2019) compararam diferentes sistemas de aquecimento de água para um modelo residencial, incluindo chuveiro elétrico, aquecedor a gás instantâneo, solar como pré-aquecimento e solar com *boiler* e resistência elétrica. A avaliação foi realizada em três diferentes cidades: Belém, Brasília e Curitiba. Como principal resultado sobre o consumo energético, os autores observaram que o sistema solar para pré-aquecimento foi o de maior eficiência energética. Outra conclusão corresponde ao fato que chuveiros elétricos não obtiveram o pior resultado entre os sistemas comparados. Os sistemas com acumulação, principalmente com o uso pela manhã, apresentaram os piores resultados, mesmo com uso de aquecimento solar.

Outro contexto tecnológico de interesse é a otimização dos modelos de controle de temperatura em *boilers* com o uso de aquecimento solar. Booyesen et al. (2019), por exemplo, citam que usualmente é fixada a temperatura de *boilers* entre 65 e 75°C, e tal estratégia leva à perda significativa de eficiência. Os autores avaliaram três outros métodos dinâmicos de controle de temperatura e observaram redução no consumo de energia entre 8 e 18%. A Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) apresenta como referência o valor de 50°C como mínimo para armazenamento de água quente. Ou seja, existe bastante variabilidade no controle e especificação dos sistemas de aquecimento de água, e é necessário esclarecer os documentos governamentais de aquecimento de água para facilitar o dimensionamento e uso das tecnologias.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar um *benchmarking* (análise comparativa) dos sistemas de aquecimento de água residencial e avaliar a aplicação em diferentes cidades no Brasil.

3. MÉTODO

O método foi proposto de modo a avaliar as instruções e ferramentas técnicas disponíveis para projetistas que desejam projetar sistemas de aquecimento de água. Desse modo, a primeira parte do trabalho foca em analisar as possibilidades tecnológicas, variabilidades na etiquetagem dos materiais e possíveis dúvidas existentes que podem ser sanadas em novas instruções normativas. A segunda parte foca em realizar o *benchmarking* com os dados existentes e instruções em vigor para uma tipologia residencial (INI-R).

3.1. Análise de dados das tabelas de eficiência energética

O Inmetro e o IPT são os órgãos responsáveis por etiquetar os principais equipamentos nacionais utilizados para aquecimento de água. Os equipamentos avaliados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 1. Para cada classe de equipamento foram realizadas análises estatísticas descritivas, de modo a compreender os sistemas.

Tabela 1 – Tabelas de eficiência energética avaliadas.

Equipamento	Quantidade de aparelhos	Instituição	Última atualização	Fonte
Coletor solar – Aplicação banho	700	Inmetro	03/03/2023 11h50	INMETRO (2023)
Sistema acoplado de coletor solar e reservatório	167	Inmetro	03/03/2023 14h30	
Aquecedor de água a gás instantâneo	295	Inmetro	03/02/2022 12h41	
Aquecedor de água a gás acumulação	20	Inmetro	09/03/2023 15h42	
Chuveiro elétrico instantâneo	410	IPT	Edição 03/2022	IPT (2022)

De acordo com o PPH (PNCEE, 2019), dispositivos elétricos como *boiler* ou aquecedor de passagem são os modelos de maior representatividade entre os sistemas (58,74%). Em sequência tem-se o uso natural de água sem aquecimento como a segunda fonte representativa (38,27%). Solar (0,95%) e gás (1,16%) são as alternativas com as menores representatividades. Desse modo, foram feitas análises estatísticas de modo a compreender a eficiência energética e os detalhes dos modelos existentes para cada tipo de equipamento.

3.2 Consumo energético de aquecimento de água

O cálculo do consumo típico seguiu a metodologia apresentada na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R), da Portaria nº 309 de 6 de setembro de 2022 (BRASIL, 2022). Nas Equações 1 e 2 são apresentados os cálculos da energia requerida para o atendimento da demanda diária de água quente (kWh/dia). A condição de referência, equivalente à classificação D de eficiência energética, é chuveiro elétrico (para sistemas sem acumulação) e *boiler* elétrico (para sistemas com acumulação). A condição real pode utilizar aquecimento de água com fontes térmicas, como solar ou gás, ou também com fonte elétrica. Para a condição de referência não são consideradas energias obtidas por sistemas de recuperação ou solar ($E_{rec,sol}$).

$$C_{\text{real ou ref}} = N_{ano} \cdot \left(f_{cE} \cdot \frac{E_E - E_{rec,sol} + E_{per,E}}{r_E} + f_{cT} \cdot \frac{E_T - E_{rec,sol} + E_{per,T}}{r_T}\right) \quad \text{Equação 1}$$

$$E_{T \text{ ou } E} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot V_{dia,T \text{ ou } E} \cdot ((\theta_{uso} \text{ ou } \theta_{arm}) - \theta_0)}{3600} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$C_{real\ ou\ ref}$ é o consumo de energia primária da edificação real ou de referência avaliada (kWh/dia); E_T ou E_E é a energia térmica ou elétrica para aquecimento de água (kWh/dia); $E_{rec,sol}$ é a energia obtida por meio de sistemas de recuperação de calor ou sistemas solares (kWh/dia); r_T ou r_E é coeficiente de rendimento do equipamento para aquecimento de água (adimensional); $E_{per,E\ ou}$ $E_{per,T}$ são as perdas térmicas dos sistemas elétricos ou térmicos (kWh/dia); ρ é a massa específica da água (kg/l); C_p é o calor específico da água (J/kg.°C); N_{ano} é o número anual de dias de ocupação (dias); f_{cE} e f_{cT} são os fatores de conversão de energia elétrica e energia térmica em energia primária. Para o f_{cE} foi considerado o valor de 1,6 e para o f_{cT} foi considerado o valor de 1,1; $V_{dia,T\ ou\ E}$ é o volume diário total de água quente consumido na edificação (m³/dia); θ_{uso} é a temperatura de uso da água quente (°C); θ_{arm} é a temperatura de armazenamento em sistemas com acumulação (°C); θ_0 é a temperatura da água fria (°C).

3.2.1 Objeto do estudo

O objeto de estudo considerado para comparação é uma Unidade Habitacional (UH) de 42,67 m², a qual está inserida em uma edificação residencial multifamiliar de Habitação de Interesse Social (HIS), em formato H. Desse modo, foi realizada a análise com solução individual, com analogia a uma proposta unifamiliar. A UH é composta por dois dormitórios, uma sala/cozinha e um banheiro. O consumo estimado de água quente de acordo com as considerações da INI-R é de 50 L/pessoa/dia, no mínimo. Considerando que a habitação tem dois quartos, e que a norma orienta para consideração de dois habitantes por quarto no mínimo, a demanda de água quente seria de 200 L/dia. A perspectiva isométrica com destaque para a UH é apresentada na Figura 1, e a planta baixa da edificação, sem escala, é apresentada na Figura 2.

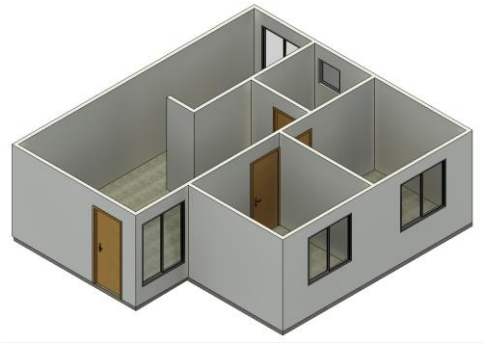


Figura 1 – Perspectiva isométrica da UH isolada.

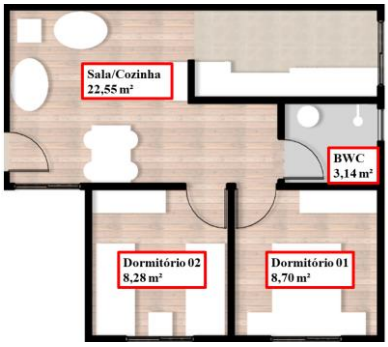


Figura 2 – Planta baixa da UH (sem escala).

3.2.2 Cidades e dados climáticos

As cidades e os dados climáticos foram escolhidos de modo a abranger maior variabilidade entre os resultados e climas simulados. Desse modo, foram escolhidas doze cidades de acordo com a divisão geográfica e climática brasileira. Na Tabela 2 são mostradas as principais características das doze cidades selecionadas.

Tabela 2 – Cidades e dados climáticos selecionados para o estudo.

Cidade	Estado	Zona bioclimática [1]	Temperatura média anual de bulbo seco (°C) [3]	Temperatura média mensal mínima de bulbo seco (°C) [3]	Temperatura de uso da água quente (°C) [2]
Curitiba	PR	1M	17,4	14,6	40
Canela	RS	1R	15,7	09,6	40
São Paulo	SP	2M	19,6	16,8	40
Porto Alegre	RS	2R	20,0	15,6	40
Vitória da Conquista	BA	3A	20,6	18,1	38
Brasília	DF	3B	21,1	19,5	40
Rio de Janeiro	RJ	4A	23,2	19,5	40
Goiânia	GO	4B	23,2	20,5	40
Recife	PE	5A	25,8	23,9	38
Cuiabá	MT	5B	26,3	22,8	40
Fortaleza	CE	6A	26,7	25,8	38
Palmas	TO	6B	26,8	25,4	38

Fonte: [1] Proposta de novo zoneamento bioclimático (ABNT, 2023) / [2] Anexo II da Portaria Inmetro nº 309/2022 (BRASIL, 2022) / [3] Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Planilha%20A.IV%20-Temperatura_ar_mensal_anual.xlsx /.

3.2.3 Sistema de referência

O sistema de referência é indicado pela INI-R como classificação "D", em uma escala de "A" a "E", e utilizado para cálculo do percentual de redução de consumo gerado pela medida de eficiência energética. Desta forma, é interessante avaliar os meios propostos pela INI-R de cálculo deste sistema de referência. Para casos em que não há acumulação de água quente, é utilizado o chuveiro elétrico, o qual pode possuir potência variada. A INI-R não comenta sobre a potência do chuveiro elétrico, porém indica o rendimento de 0,95 para este aparelho. Sabe-se, porém, que existem diferentes eficiências energéticas no mercado, conforme explorado na análise das certificações do IPT para os chuveiros elétricos (seção 3.1).

Para os sistemas com acumulação, a INI-R indica o uso de *boiler* elétrico como referência de consumo de eletricidade. O *boiler* elétrico é constituído por um reservatório de água, usualmente com revestimento externo metálico e material isolante, e uma resistência elétrica interna ao reservatório com aquecimento por

efeito Joule. Desse modo, é necessária a avaliação das perdas térmicas ocorridas tanto na distribuição da água quente, como as perdas no próprio reservatório. A INI-R indica o rendimento de 0,85 para este tipo de sistema. Para o cálculo de perdas, foram utilizadas as considerações de isolamento do modelo de referência da INI-R.

3.2.4 Sistemas de aquecimento de água solar e gás

Os sistemas alternativos ao de referência foram aquecimento por meio de energia solar com apoio elétrico, e gás de passagem. Outros sistemas disponíveis no mercado, como bombas de calor, não foram dimensionados por apresentar baixa representatividade no setor residencial. Desse modo, foram dimensionados modelos de sistemas de aquecimento solar por meio da INI-R, com os parâmetros padronizados da instrução.

Para o dimensionamento do sistema a gás foi usado o estudo de Sangoi e Ghisi (2019) como referência, bem como para cálculo da potência dos chuveiros a gás e elétrico. O consumo de energia em *stand-by* e em uso dos aparelhos aquecedores foi obtido por meio da ficha técnica dos aquecedores selecionados.

3.2.5 Perdas térmicas e parâmetros de otimização

As perdas térmicas foram calculadas por meio das Equações 3, 4, 5 e 6, conforme disposto na INI-R. As perdas são separadas entre perdas de tubulação de distribuição ($E_{per,tub}$), de recirculação ($E_{per,recirc}$) e do reservatório de água quente ($E_{per,res}$). Para chuveiros elétricos não há perdas, uma vez que o aquecimento é realizado no ponto de consumo. Para os demais tipos, há perdas por distribuição, calculada de acordo com o comprimento da tubulação entre o ponto de aquecimento ou reserva e o ponto de uso. Caso ocorra o armazenamento de água quente, as perdas do reservatório de água quente também são consideradas.

$$E_{per} = E_{per,tub} + E_{per,res} + (E_{per,recirc} = 0) \quad \text{Equação 3}$$

$$E_{per,tub} = \frac{H_{tub\ ou\ recirc} \cdot F_{per,tub} \cdot L_{tub} \cdot (\theta_{uso} - \theta_0)}{1000} \quad \text{Equação 4}$$

$$F_{per,tub} = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda} ln \frac{d_A}{d_R} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_A}} \quad \text{Equação 5}$$

$$E_{per,res} = \frac{(\theta_{arm} - \theta_0)}{\Delta\theta_{res,sby}} \cdot E_{res,sby} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:
E_{per} é a perda de energia dos sistemas (kWh/dia); $E_{per,tub}$ é a perda de energia da distribuição de água quente (kWh/dia); $E_{per,res}$ é a perda de energia das trocas térmicas do reservatório de água quente (kWh/dia); $E_{per,recirc}$ é a perda de energia da recirculação de água quente, desconsiderada nesse estudo (kWh/dia); $H_{tub\ ou\ recirc}$ é o fator de horas de utilização por dia da tubulação. Para distribuição considera-se 2,083 multiplicado pelo V_{dia} e para recirculação considera-se 24 ou o número de horas de recirculação, se houver (h/dia); $F_{per,tub}$ é o fator de perdas para a tubulação avaliada (W/(m·K)); L_{tub} é o comprimento da tubulação avaliada (m); $E_{res,sby}$ é a perda térmica específica do reservatório, fornecida por fabricante (kWh/mês/l); $\Delta\theta_{res,sby}$ é a diferença de temperatura em testes com o reservatório em *standby* (°C) com a INI-R indicando o valor de 29°C; α_a é o coeficiente de transferência de calor, considerado 8 (W/(m²·K)); d_a é o diâmetro externo da tubulação com isolamento (m); d_r é o diâmetro da tubulação (m); λ é a condutividade térmica do isolamento (W/(m·K)).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Eficiência energética de chuveiros elétricos

A primeira análise realizada foi referente aos dados disponibilizados pelo IPT sobre chuveiros elétricos. Consistem em uma seleção de marcas e modelos de chuveiros com a caracterização de cinco principais variáveis: tensão de fornecimento de energia elétrica (V); potência elétrica nominal (W); consumo máximo mensal do aparelho (kWh/mês); consumo mínimo mensal do aparelho (kWh/mês); elevação de temperatura para o consumo mensal máximo (°C) e vazão de água para o consumo mensal mínimo (L/min). A classificação do aparelho é realizada de acordo com a potência nominal. Realizando uma matriz de correlação linear entre as variáveis existentes, pode-se descobrir o grau de interdependência entre os dados, conforme apresentado na

Figura 3. O número de chuveiros elétricos separados por potência nominal é mostrado na Figura 4. Percebe-se maior representatividade de chuveiros de 5,5 kW.

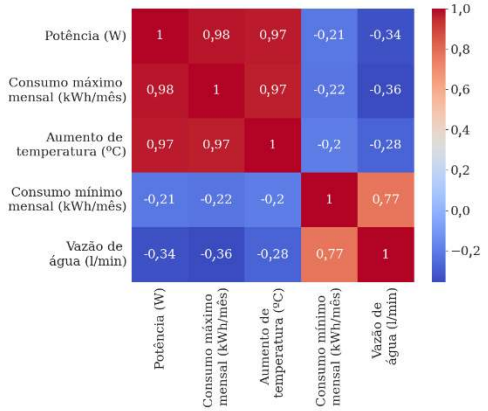


Figura 3 – Correlação linear entre variáveis de classificação do IPT para chuveiros elétricos.

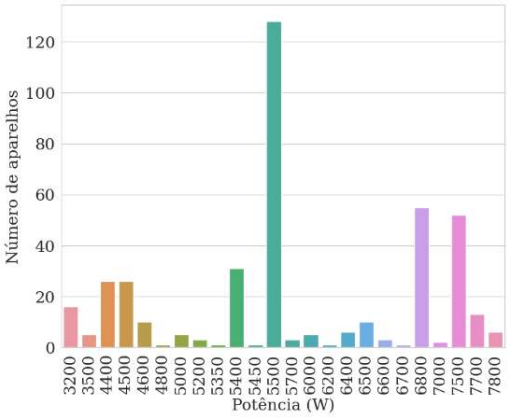


Figura 4 – Quantidade de chuveiros avaliados pelo IPT de acordo com a sua potência.

Percebe-se que há correlação direta entre potência, consumo máximo e aumento de temperatura, o que é esperado, uma vez que o aquecimento de água do chuveiro elétrico ocorre por efeito Joule. Além disso, o consumo mínimo de grande parcela dos aparelhos é próximo de 10 kWh/mês, o que é relativo ao aumento mínimo de temperatura. Aparelhos de maior potência possuem reguladores de temperatura, fornecendo ao usuário maior controle sobre o consumo e temperatura. Dessa forma, existe aumento da variação entre o consumo mínimo e máximo mensal conforme há aumento na potência do aparelho. A Figura 5 apresenta a relação entre consumo máximo e mínimo de cada aparelho. A Figura 6 mostra a vazão de água para o consumo mínimo mensal. Percebe-se que há correlação (Pearson de 0,77) entre as variáveis da Figura 6, porém alguns chuveiros apresentam maior consumo mesmo com menores vazões. Também se percebe que, para a condição de consumo mínimo padronizado, alguns chuveiros de 7200W possuem capacidade de maior vazão e menor consumo que chuveiros de menor potência. Ou seja, existe variabilidade entre os dispositivos existentes. Também se nota a dificuldade em compreender a eficiência global, uma vez que a análise é multivariável.

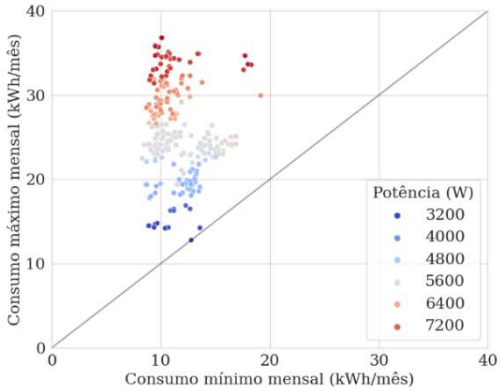


Figura 5 – Relação entre consumo mínimo e máximo.

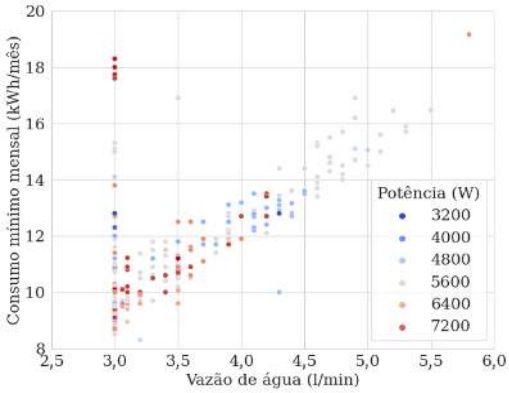


Figura 6 – Relação entre vazão de água e consumo mínimo.

4.2 Eficiência energética de aquecedores solares

A análise de dados do aquecimento solar foi realizada de modo a compreender tecnologias, diferenças entre sistemas e possíveis inferências que projetistas possuem ao utilizar a tabela de eficiência energética. Foram analisados três sistemas de aquecimento solar de água, incluindo: coletor solar, reservatório térmico e sistema acoplado com coletor e reservatório. Em relação ao coletor solar, foram observados cinco tipos de tecnologias com diferentes valores de Produção Média Mensal de Energia (PMME). Esta variável é responsável por classificar de “A” a “E” o coletor utilizado. Na Figura 7 é apresentada a quantidade de entradas por tipo de tecnologia e na Figura 8 a PMME separada pelos diferentes tipos de tecnologia. É possível verificar a presença de duas tecnologias com maior quantidade de etiquetas (alumínio e vidro de borossilicato), as quais também estão mais presentes no mercado.

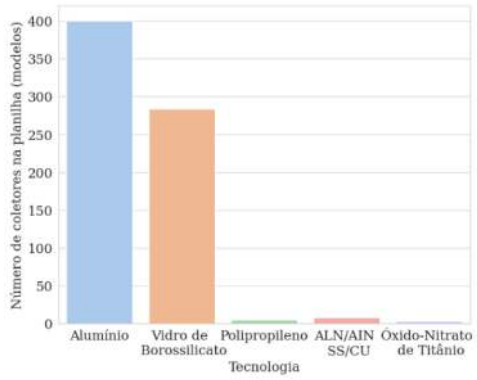


Figura 7 – Número de dispositivos por tecnologia certificados.

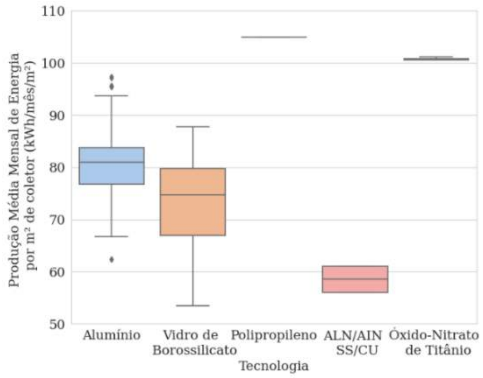


Figura 8 – Produção média por tipo de tecnologia.

Em relação aos sistemas acoplados, todos os coletores considerados são de vidro de borossilicato. As capacidades dos reservatórios de sistemas acoplados variam de 120 a 400 litros, constituídos usualmente em corpo de aço inox, e a produção média por dispositivo varia entre 137,4 e 536,7 kWh/mês, sendo a área de captação variada entre 1,68 e 4,81 m². Ou seja, existem dispositivos para diferentes necessidades, dependendo do dimensionamento e da demanda de água quente.

4.3 Eficiência energética de aquecedores a gás

Os aquecedores a gás representam somente 1,16% dos sistemas de aquecimento de água no país (PNCEE, 2019). Na região Sul do país existe, porém, certo interesse em adotar o sistema caso este seja economicamente atrativo (PNCEE, 2019). Dessa forma, é interessante discutir a eficiência energética dos sistemas, bem como as diferenças encontradas nos modelos etiquetados pelo Inmetro. Dentre os modelos etiquetados, 154 usam Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e 141 usam Gás Natural (GN). A Figura 9 mostra a potência dos aparelhos por tipo de gás. A Figura 10 mostra o rendimento dos aparelhos separado por tipo de gás.

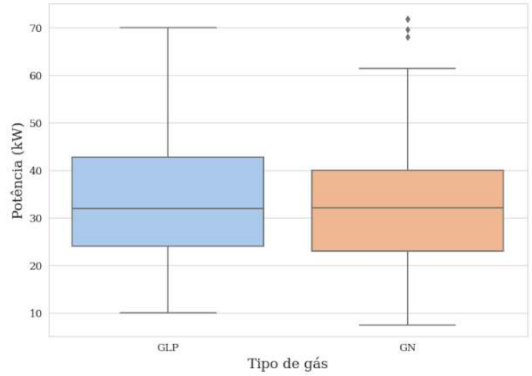


Figura 9 – Potência do aparelho por tipo de gás.

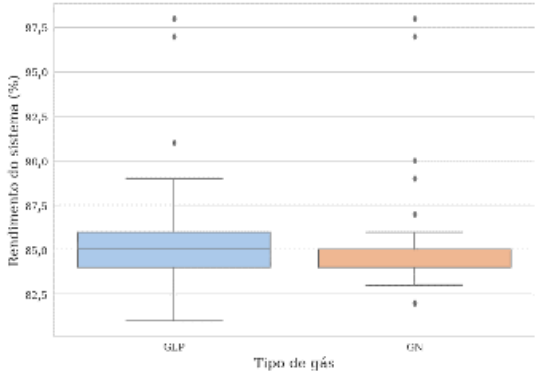


Figura 10 – Rendimento por tipo de gás.

Percebe-se haver semelhanças entre os aparelhos com os dois tipos de gás, nos quais há similar eficiência média e potência. O consumo de gás dentre os aparelhos variou entre 1 e 5 kg para GLP, e entre 1 e 6 m³ de gás por hora, enquanto o rendimento dos sistemas variou entre 82 e 98%. Tal valor de rendimento destoa do valor de referência adotado pela INI-R, que é de 70% para um único ponto de consumo e de 65% para múltiplos pontos de consumo. Estudos futuros podem ser realizados para conferir estes valores, ou avaliar se a INI-R considera outros fatores no rendimento. Também se percebe que ambos os gases apresentam mesmo fator de conversão (1,1) para energia primária. Porém, o GLP apresenta maiores emissões de CO_2 por kWh gerado. Para produção de 1 kWh, o GLP produz 0,227 kg de CO_2, enquanto GN produz 0,202 kg de CO_2. Os modelos com as maiores eficiências (97-98%) são do tipo *condensing boiler*, tecnologia mais otimizada de aquecedor.

Por meio da Figura 9, percebe-se haver variabilidade de tipo entre os modelos existentes no mercado, com modelos mais ou menos potentes, dependendo do dimensionamento. Os modelos avaliados são sistemas de passagem, porém o Inmetro também fornece dados sobre os sistemas de acumulação a gás. Para modelos com acumulação, há somente etiquetas para vinte exemplares, visto ser uma modalidade mais rara de

aquecimento de água no país. De toda forma, os volumes da acumulação variam entre 80 e 190 litros, com potência entre 6,7 e 9,3 kW e rendimento entre 76 e 81%. O rendimento condiz com o da INI-R, de 76%.

4.4 Consumo típico do estudo de caso

O estudo de caso serviu para avaliar o método proposto na INI-R para avaliação do sistema de aquecimento de água em um apartamento (UH) de uma edificação residencial multifamiliar. Desse modo, foram calculados o consumo na condição de referência (chuveiro elétrico e *boiler*), uma alternativa com aquecimento solar e uma alternativa com aquecimento a gás. Em todos os casos foram avaliadas as perdas dos sistemas. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o aquecimento por chuveiro elétrico, gás de passagem, *boiler* elétrico e aquecimento solar com apoio elétrico, com a conversão feita para energia primária.

Tabela 3 – *Benchmarks* de consumo de energia para aquecimento de água para o estudo de caso, em diferentes climas no Brasil.

Cidade	**Aquecimento sem acumulação**		**Aquecimento com acumulação [3]**	
	Chuveiro elétrico C_{chuv} (kWh/ano) [1]	**Gás passagem C_{gas} (m³/ano de GN) e do aparelho (kWh/ano) [2]**	***Boiler* elétrico C_{boiler} (kWh/ano)**	***Boiler* com apoio em aquecimento solar C_{solar} (kWh/ano) [4]**
Curitiba	3226	268 / 62	5962	2440
Canela	3467	288 / 62	6274	2585
São Paulo	2912	242 / 60	5558	2118
Porto Alegre	2855	237 / 60	5485	1928
Vitória da Conquista	2484	206 / 59	5370	1707
Brasília	2698	224 / 60	5283	1071
Rio de Janeiro	2398	199 / 59	4897	1311
Goiânia	2398	199 / 59	4897	813
Recife	1742	144 / 57	4416	556
Cuiabá	1956	162 / 57	4328	291
Fortaleza	1613	134 / 56	4250	-34 [5]
Palmas	1599	133 / 56	4232	315

* Foram mostrados valores em energia primária, com a correção do fator de energia primária e o rendimento do equipamento;
[1] Eficiência dos chuveiros elétricos foi considerada de 0,95.
[2] Inclui perdas por distribuição após o aquecimento, considerando 10 m de tubulação. O consumo de GN foi calculado por meio das Equações 1 e 2 considerando que cada 10,23 kWh de energia térmica é suprida por 1 m³ de GN. O consumo do aparelho (visores do aquecedor, ignição da chama, demais gastos para funcionamento) foi obtido através da etiquetagem de um aparelho condizente com a potência mínima. Considerou-se rendimento de 0,70 conforme INI-R;
[3] Inclui perdas por distribuição, armazenamento e recirculação – Para distribuição foi considerado 25 m de tubulação. Foi desconsiderada a recirculação para o estudo de caso. Para o reservatório, considerou-se volume de 200 litros com a perda térmica específica de 0,14 kWh/mês/L, conforme INI-R;
[4] Considerou-se um sistema acoplado com volume de 200 litros, área de 1,98 m² e PMME de 82,4 kWh/mês.m²;
[5] O valor negativo indica que, para esta cidade, o sistema de aquecimento solar atendeu às demandas de energia para aquecimento.

O cálculo das perdas foi realizado em duas partes: as perdas de distribuição e as perdas do reservatório. Desse modo, é interessante avaliar a influência dos parâmetros no dimensionamento total. Primeiramente, para o aquecimento por chuveiro elétrico não há perdas, devido ao aquecimento ocorrer no ponto de uso. Para o gás de passagem há somente perdas entre a saída do aquecedor e o chuveiro, sendo calculadas por meio das Equações 4 e 5. Obteve-se um fator de perdas médio de 9 kWh/ano para a UH.

Para os sistemas de aquecimento com acumulação de água, há ambas as perdas de distribuição e reservatório. A distribuição foi responsável por perdas médias de 23 kWh/ano e a reserva por 322 kWh/ano de energia elétrica (sem a conversão para primária e correção de rendimento do aparelho). O fator de perdas por acumulação foi responsável por 93% das perdas calculadas. Com tais valores e a manutenção da temperatura em 50°C, obteve-se o sistema de *boiler* elétrico como de maior consumo de energia primária.

Em relação à potência dos aparelhos, os chuveiros elétricos certificados pelo IPT têm potência variada entre 3,2 e 7,8 kW, enquanto aquecedores instantâneos a gás tem potência entre 7,4 e 71,8 kW. Ao dimensionar a potência requerida por meio do método proposto por Sangoi e Ghisi (2019), obtiveram-se as potências necessárias para cada cidade. Para chuveiros elétricos, a potência mínima (3,2 kW) atenderia as cidades de Fortaleza, Palmas e Recife; enquanto para chuveiros a gás, a potência mínima (7,4 kW) atenderia a Brasília, Cuiabá, Fortaleza, Goiânia, Palmas, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, São Paulo e Vitória da Conquista. Ou seja, obteve-se que sistemas a gás são construídos para maiores vazões e potências. Outro ponto é o custo do sistema, usualmente mais caro que as demais alternativas.

O sistema de acumulação de referência (*boiler*) não possui otimização para diminuir o consumo de energia considerando a operação do sistema. Cita-se novamente o exemplo de Booyesen et al. (2019), no qual

o uso de controladores e automação da residência foi capaz de obter economia no aquecimento. O simples uso de um sistema com termostato fixo pode causar consumos bastante superiores ao de um chuveiro elétrico, principalmente em regiões quentes, nas quais o consumo de água quente é baixo e a potência requerida dos chuveiros é menor. Para estes sistemas pode-se dispor mais foco em outros componentes da UH, conforme avaliado por Teixeira et al. (2022) com os dados do PPH, como otimizar o uso de ar-condicionado e a eficiência energética dos refrigeradores, e reduzir o consumo total da edificação.

Também se percebe grande diferença do consumo estimado pelos cálculos da INI-R com o *benchmark* das edificações residenciais existentes. Para o consumo da residência foi utilizado o valor de 50 litros de água quente por dia por habitante, conforme indicado pela INI-R. Esse valor é bastante superior ao encontrado por Sborz et al. (2022) para HIS no Sul do Brasil, de aproximadamente 21 litros/pessoa/dia. Como o volume de água quente está linearmente correlacionado com todas as variáveis avaliadas, é compreensível que utilizar o consumo hídrico normativo aumente em, aproximadamente, 2,5 vezes o consumo energético estimado. Desta forma, se considerados os valores inferiores, próximos ao avaliado de 21 litros/pessoa/dia, espera-se obter consumo energético mais próximo dos *benchmarks* brasileiros.

Geraldi et al. (2022), por exemplo, avaliaram o perfil longitudinal de consumo de energia em HIS e a evolução temporal entre 2003 e 2021. Para 2021, os autores obtiveram o consumo médio anual de energia elétrica em habitações residenciais de baixa renda de 1977,21 kWh/UH.ano. Corrigido para energia primária tem-se o valor de 3.163,54 kWh/UH.ano. Tal valor variou entre as diferentes regiões do país e também entre os meses do ano, fator que dificulta a avaliação dos perfis de consumo. Porém, fica nítida a distorção da realidade brasileira com os resultados desta pesquisa, uma vez que os consumos estimados para aquecimento de água são bastante próximos ou até superiores ao de toda a UH. Multiplicando as composições de consumo de Teixeira et al. (2022) com o valor médio encontrado por Geraldi et al. (2022), espera-se um consumo em chuveiros elétricos de: 1,97 kWh/UH.ano no Norte; 51,41 kWh/UH.ano no Nordeste; 326,24 kWh/UH.ano no Centro-Oeste; 470,58 kWh/UH.ano no Sudeste; e 668,30 kWh/UH.ano no Sul. Tais valores são em energia elétrica, então seriam multiplicados por 1,6 para transformação em energia primária (considerando o fator de conversão da INI-R), porém demonstram a diferença entre os cálculos estimados pela orientação da INI-R com a realidade observada em HIS, na qual quase não há consumo de energia para chuveiros elétricos no Norte do país, segundo o PPH.

O modelo de cálculo atual da INI-R para aquecimento solar também é bastante complexo e dificulta sua aplicação para análises simplificadas. Muitos dos fatores não contemplam a realidade de uso, como qual o período do uso da água quente e qual a dependência nos componentes de apoio elétrico ou a gás. Sangoi e Ghisi (2019) avaliaram o uso de aquecimento solar e demonstraram diferenças no consumo de energia para padrão de uso matutino ou noturno. Ou seja, existem diferenças entre o consumo simulado pela INI-R e o resultado observado nos demais estudos. Pesquisas que comparem consumos reais, em aplicações práticas, aos simulados de acordo com a INI-R podem melhor avaliar as dúvidas ponderadas nesta pesquisa.

De toda forma, a energia solar foi capaz de prover entre 5,00 e 6,24 kWh/dia. O valor foi subtraído da demanda energética do sistema com *boiler*, dadas as respectivas correções do fator de energia e de eficiência, obtendo consumos finais entre nulo e 2585 kWh/ano de energia primária. Tais reduções proviriam etiqueta A para todos os sistemas solares avaliados, com resultados similares aos obtidos na literatura.

4.5 Limitações da pesquisa

Faz-se interessante indicar as diversas limitações e dificuldades encontradas ao realizar o *benchmarking.* Primeiramente, foi utilizado o PPH como referência para comparação do consumo de água quente no Brasil, por ser uma fonte recente de dados. Porém, a pesquisa apresenta limitações e é resguardado que pode não apresentar fidelidade total com a realidade brasileira. Avaliações mais precisas sobre o uso de água quente em todo o território nacional podem comprovar ou recusar as hipóteses de consumo nulo de água quente no Norte do país, consumo elevado no Sul e intermediários nas demais regiões.

Como segunda limitação cita-se a dificuldade de compreender os procedimentos de avaliação de eficiência energética nas tabelas do Inmetro e IPT. Projetistas que desejem utilizar as tabelas como referência para a comparação de sistemas encontram dificuldades em relacionar as diferentes variáveis, como a eficiência energética e a PMME por m². Sem possuir o indicador de mensuração dos valores, é complexo compreender qual dos sistemas é mais eficiente em casos de divergência no maior valor entre ambas as variáveis. Também, a INI-R indica o uso de parâmetros que não estão mais disponibilizados nas tabelas de eficiência energética para aquecimento solar de água, fator que dificulta a aplicação da etiquetagem e introduz incertezas e erros na modelagem.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou os documentos oficiais disponibilizados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas para avaliação dos sistemas de aquecimento de água. Por meio dos dados de eficiência energética pode-se obter informações sobre a realidade da água quente no país. Por exemplo, grande parte dos chuveiros etiquetados possui 5.500W de potência, sendo etiquetados pelo IPT como classificação "D". Porém, o consumo mínimo dentro dos aparelhos etiquetados apresentou grandes variações quando regulados ao menor aumento de temperatura. Demais considerações corroboram a ideia que chuveiros elétricos não são vilões em perspectiva nacional, mas o aquecimento de água deve ser otimizado para muitas das regiões do Brasil, com o uso de energia solar, principalmente. Desse modo, pode-se diminuir o consumo de energia das edificações e melhorar a eficiência energética de HIS.

Em relação ao estudo de caso, percebe-se alto consumo de energia para aquecimento de água em todos os tipos, quando comparados à literatura e ao consumo energético esperado para toda a Unidade Habitacional. Dadas as respectivas diferenças, percebe-se que os sistemas com uso de energia solar são valorizados pela certificação, por reduzirem o consumo em relação ao *boiler* elétrico. Porém, percebe-se na literatura maiores complexidades no dimensionamento e avaliação de sistemas de armazenamento, como controle de patógenos e métodos de automação. Desse modo, os métodos simplificados tendem a mais dificilmente representar a realidade do objeto estudado. De toda forma, os resultados de consumo adicionados às análises dos dados de eficiência energética servem como exemplo para auxiliar projetistas na compreensão do estado da arte de certificação de aquecimento de água no país. Estudos futuros com metodologias de avaliação de água quente devem explorar os demais pontos elencados e auxiliar projetistas na obtenção de eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Grupo de Trabalho de Zoneamento Bioclimático. Comissão de Estudos de Eficiência Energética e Desempenho Térmico nas Edificações. CE 002. 135007. 2023.

ALTOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D.; CARLO, J. C. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 3, p. 75–87, set. 2012.

BOOYSEN, M. J. et al. How much energy can optimal control of domestic water heating save? **Energy for Sustainable Development**, v. 51, p. 73–85, ago. 2019.

BRASIL. Portaria Nº 309, de 6 de setembro de 2022. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado. 2022.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional - Relatório final (2022)**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

GERALDI, M. S. et al. Análise longitudinal do consumo de energia elétrica do setor residencial no Brasil. XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, n. 19, p. 14, 9 nov. 2022.

IEA (2019), The Critical Role of Buildings, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings, License: CC BY 4.0

IEA (2022), Buildings, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/buildings, License: CC BY 4.0

IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001

INMETRO (Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia). Tabelas de consumo/eficiência energética. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp. Acesso em: 15 mar. 2023.

IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). Certificação de chuveiro elétrico. Laboratório de instalações prediais e saneamento. 2022.

PNCEE (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (PPH). 2019. Disponível em https://www.eletrobras.com/pphweb. Acesso em: 15 mar. 2023.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, out. 2010.

SANGOI, J. M.; GHISI, E. Energy Efficiency of Water Heating Systems in Single-Family Dwellings in Brazil. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1068, 22 maio 2019.

SBORZ, J. et al. Hourly and daily domestic hot water consumption in social housing dwellings: An analysis in apartment buildings in Southern Brazil. **Solar Energy**, v. 232, p. 459–470, jan. 2022.

TEIXEIRA, C. A. et al. Bottom-up modelling of electricity end-use consumption of the residential sector in Brazil. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 3, p. 113–131, set. 2022.

UNITED NATIONS. Sustainable Development Goals. Goal 7 - Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. Disponível em: https://sdgs.un.org/goals/goal7. Acesso em: 15 mar. 2023.

VECHI, M.; GHISI, E. Evaluation of Water Heating Systems Through Life Cycle Assessment. **European Journal of Sustainable Development**, v. 7, n. 3, 1 jul. 2018.

WILLEM, H.; LIN, Y.; LEKOV, A. Review of energy efficiency and system performance of residential heat pump water heaters. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 191–201, maio 2017.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor gostaria de agradecer a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pela bolsa fornecida durante a realização deste trabalho. Todos os autores agradecem a Universidade Federal de Santa Catarina, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e a Eletrobrás. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.