ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Eficiência energética de uma residência com uso de energia solar térmica no clima tropical de altitude

Energy efficiency of a residence using solar thermal energy in a Brazilian tropical highland climate

Nathália Otília Gomes Olavo
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | nathaliaotilia.olavo@gmail.com
Julia Cordeiro Vieira
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | juliacordeiroengcivil@gmail.com
Flávia Spitale Jacques Poggiali
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | flaviaspitale@gmail.com

Resumo

O crescente desafio ambiental e energético global tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis na construção civil. No Brasil, o consumo de energia elétrica para aquecimento de água em residências é elevado, tornando a energia solar uma alternativa promissora. Este estudo quantificou o impacto da energia solar térmica na eficiência energética de uma habitação em Betim-MG, usando o método simplificado da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R). A integração de placas solares elevou a classificação de eficiência energética do sistema de aquecimento de água de D para A, resultando em 85% de economia. A comparação entre resultados estimados e reais de faturas de energia elétrica demonstrou a eficácia do método simplificado da INI-R na avaliação da eficiência energética da residência. Esses achados fornecem uma solução prática para reduzir o consumo de eletricidade para aquecimento de água em regiões de clima tropical de altitude, visando promover a conscientização sobre práticas sustentáveis na construção civil.

Palavras-chave: Aquecimento solar. Desempenho energético de edificações. Habitações. INI-R.

Abstract

The growing global environmental and energy challenges have driven the search for sustainable alternatives in the construction industry. In Brazil, electricity consumption for residential water heating is high, making solar thermal energy a promising alternative. This study quantified the impact of solar energy on the energy efficiency of a residence in Betim-MG, using the simplified method of the Inmetro Instruction for the Classification of Energy Efficiency of Residential Buildings (INI-R). The integration of solar panels elevated the energy efficiency rating of the water heating system from D to A, resulting in 85% savings. The comparison between estimated and actual electricity bills demonstrated the effectiveness of the INI-R simplified method in evaluating the home's energy efficiency. These findings provide a practical solution for reducing electricity consumption for water heating in high-altitude tropical regions, aiming to raise awareness of sustainable practices in the construction industry.

Keywords: Solar heating. Building energy performance. Dwellings. INI-R.

Como citar:
OLAVO, N. O. G., VIEIRA, J. C., POGGIALI, F. S. J. Eficiência energética de uma residência com uso de energia solar térmica no clima tropical de altitude. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

INTRODUÇÃO

A implementação de tecnologias eficientes e sustentáveis tornou-se uma prioridade global na construção e operação de edifícios, em resposta aos desafios climáticos e energéticos [1]. A crescente demanda por energia elétrica, impulsionada pela expansão industrial, urbanização e aumento populacional, é um desafio premente para a sustentabilidade energética no Brasil e no mundo [2]. Entre 2001 e 2021, o consumo de energia elétrica no Brasil aumentou em média 4,2% ao ano, destacando-se o consumo residencial, com uma elevação de 3,65% ao ano [3].

As fontes não renováveis de energia são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), agravando a crise climática global. Embora o Brasil tenha uma matriz energética predominantemente renovável [3], a dependência das hidrelétricas expõe o país a períodos de seca, como evidenciado em crises hídricas severas em 2014 e 2021. Isso pode aumentar a necessidade de suprimento energético por termelétricas, que são mais dispendiosas e poluentes. Assim, a diversificação energética, especialmente com a energia solar, surge como uma alternativa promissora devido à alta irradiação solar no país [3-5].

A energia solar, tanto fotovoltaica quanto térmica, destaca-se pelo potencial de suprir as demandas elétricas domésticas. A energia solar térmica é especialmente utilizada no aquecimento de água, podendo substituir ou complementar sistemas elétricos e a gás. Esta tecnologia, impulsionada por políticas governamentais, como isenções fiscais e programas de eficiência energética da ANEEL, é reconhecida por sua simplicidade, disponibilidade e viabilidade econômica [4]. No setor residencial, os gastos com aquecimento de água em 2019 representam 27% do total de energia elétrica consumida no país [6], destacando o aquecimento solar como uma das melhores alternativas para melhorar a eficiência energética [4].

Desde 2014, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (Procel Edifica) e o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) têm promovido aprimoramentos no método de avaliação da eficiência energética de edificações no Brasil. Em 2022, foi publicada a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R). Essa normativa estabelece critérios para a classificação de eficiência energética. A classificação pode variar em cinco níveis, de A (mais eficiente) a e E (menos eficiente), sendo consolidada pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) [7].

Diversas pesquisas evidenciam os benefícios da energia solar térmica na eficiência energética das edificações. Em Viçosa-MG, a substituição do chuveiro elétrico pelo aquecedor solar com backup elétrico reduziu em média 70% no consumo de energia elétrica para aquecimento de água e 36% no consumo total de energia residencial [8]. Em estudo comparativo de sistemas de aquecimento em climas contrastantes do Brasil, o aquecimento solar combinado com chuveiros elétricos foi a opção mais eficiente, alcançando classificação A de eficiência energética [9]. Em Tijucas-SC, a transformação de uma residência em edifício de energia zero melhorou significativamente a classificação da envoltória (de B para A) e do sistema de aquecimento de água (de D para A), reduzindo 62% do consumo elétrico [10]. Caxias

do Sul-RS, medidas de eficiência energética e aquecimento solar em habitações sociais, visando quase zero energia, reduziram 13,1% do consumo anual de energia primária e até 57% do consumo de eletricidade pela geração de energia fotovoltaica [11]. Um estudo de *benchmarking* para aquecimento de água em diferentes cidades brasileiras demonstrou reduções de 24 a 100% no consumo ao utilizar energia solar [12].

Apesar dos avanços, ainda há lacunas significativas na implementação e aceitação de sistemas de aquecimento solar no Brasil, como a falta de conscientização da população e o custo inicial relativamente elevado [4,13]. Neste contexto, este estudo visa investigar o potencial da energia solar para melhorar a eficiência energética em residências no clima tropical de altitude brasileiro, comparando o nível de classificação de eficiência energética de uma habitação unifamiliar existente em Betim/MG com e sem o uso de Sistema de Aquecimento Solar (SAS), pelo método simplificado da INI-R.

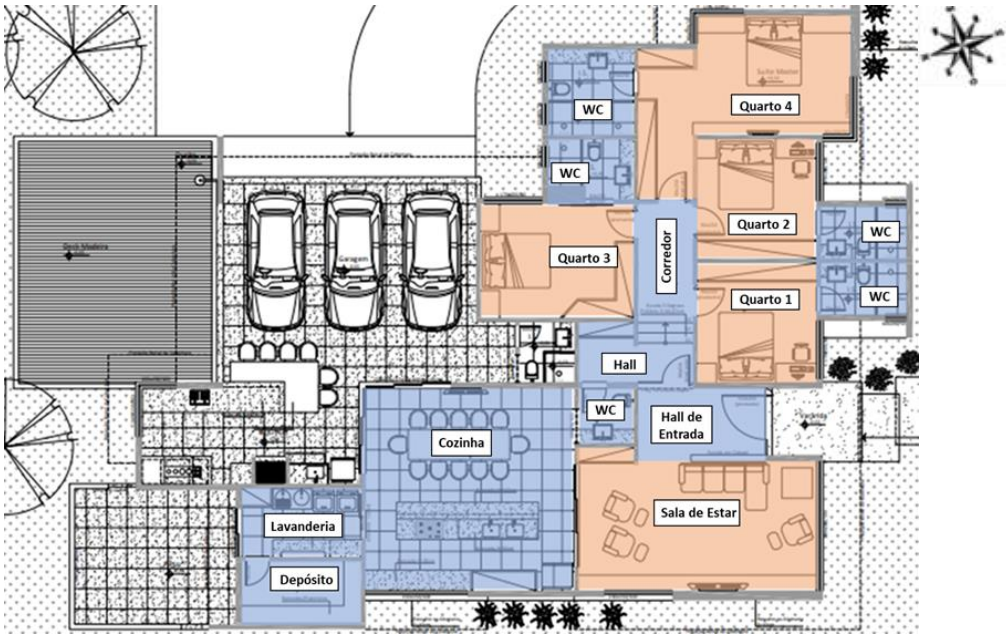
MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em quatro etapas principais: (1) caracterização do estudo de caso; (2) classificação da edificação pelo método simplificado da INI-R, sem placas solares (3) e com placas solares; e (4) comparação e análise dos resultados.

CARACTERIZAÇÃO DA ENVOLTÓRIA

A edificação analisada é uma Unidade Habitacional (UH) localizada em Betim, MG, na região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Construída em 2017, possui área de 189,54 m² e foi dimensionada para cinco pessoas. Seus ambientes incluem quatro dormitórios com suíte, sala de estar, hall de entrada, corredores, cozinha integrada com copa, dois lavabos, lavanderia e depósito. O pé-direito é de 2,60 m, exceto na copa, com 5,38 m. A **Figura 1** destaca os ambientes de permanência prolongada (APP) e transitória (APT) da edificação em laranja e azul, respectivamente.

Figura 1: Planta baixa da edificação e identificação dos APTs e APPs.



Fonte: [14], adaptado pelos autores.

A edificação está localizada na Zona Bioclimática 2 (ZB2) [15]. A orientação solar das fachadas foi simplificada conforme a INI-R (2022), facilitando as análises. A fachada frontal está orientada para o Sul, a posterior para o Norte, a lateral direita para o Leste e a esquerda para o Oeste. Os planos laterais e frontal possuem sombreamentos verticais fixos devido à marquise da laje, e sombreamentos horizontais devido aos recuos na fachada (**Figura 2**). Quanto às condições de contorno, os ambientes estão em contato com o solo e a cobertura é exposta ao sol e ao vento.

Figura 2: Vista das fachadas da edificação: frontal (à esquerda acima); posterior (à direita acima); lateral direita (à esquerda abaixo); e lateral esquerda - Oeste (à direita abaixo).



Fonte: os autores.

Os parâmetros construtivos dos APPs foram avaliados pelo método simplificado da INI-R (2022), levantando-se parâmetros geométricos da UH, como dimensões horizontais das paredes, ângulos de sombreamento e orientação solar. Os parâmetros de transmitância térmica (U), capacidade térmica (CT), absortância solar (a) e fator solar (FS) dos elementos construtivos foram calculados. A edificação foi construída em alvenaria de bloco de concreto, com vigas, pilares e laje em concreto armado. A Tabela 1 detalha as propriedades térmicas da envoltória. Para o vidro, monolítico incolor de 6 mm de espessura, adotou-se U_{VID} de 3,485 W/m².K e FS de 0,34 kJ/m²K [16].

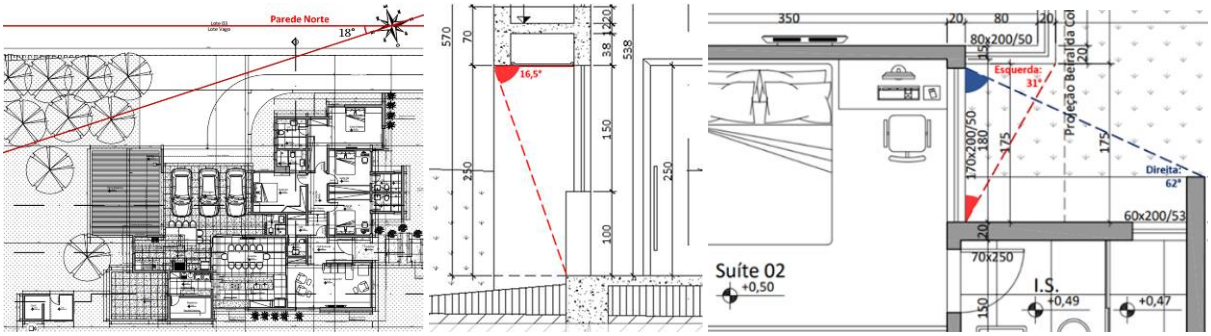
Tabela 1: Propriedades térmicas dos sistemas construtivos.

Elemento	Descrição	U (W/m²K)	CT (kJ/m²K)	Absortância
Piso	Laje maciça de concreto (12cm)	4,79	288	-
Paredes externas	Gesso interno (0,2cm) Bloco de concreto (14x19x39cm) Argamassa externa (2,5cm) Tinta Acrílica Fosca	2,57	222	0,449
Cobertura	Laje pré-moldada com lajota cerâmica (12cm) Câmara de ar (>5,0cm) Telha metálica (0,06cm) Tinta Acrílica Fosca	1,68	169	0,449

Fonte: [16].

Posteriormente, os ângulos de desvio e sombreamento foram levantados para cada APP (**Figura 3**). O ângulo de desvio das paredes norte em relação ao norte verdadeiro é de -18°. Devido aos beirais com projeções horizontais de diferentes tamanhos, obteve-se diferentes ângulos verticais de sombreamento da fachada (AVS_{FAC}). Além disso, a edificação apresenta autossombreamento em alguns pontos, devido aos recuos nas fachadas, resultando em diferentes ângulos horizontais de sombreamento da fachada direito (AHF_D) e esquerdo (AHF_E). Para as esquadrias, foram levantadas as áreas de elementos transparentes ($A_{t,APP}$), áreas efetivas de abertura para ventilação ($A_{v,APP}$) e existência de venezianas e portas internas dos APPs, conforme a orientação solar. Por fim, os dados foram inseridos na interface *web* de predição dos parâmetros de eficiência energética, conforme INI-C (2022).

Figura 3: Ângulos de desvio norte verdadeiro (à esquerda); de sombreamento vertical na parede externa leste da sala (ao centro); e de sombreamento horizontal na parede externa sul do dormitório 2 (à direita).



Fonte: [14], adaptado pelos autores, sem escala.

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Para obter parâmetros de refrigeração e aquecimento da envoltória, realizaram-se levantamentos dos dispositivos de ar condicionado instalados na edificação (Tabela 2). Os dados das etiquetas de cada aparelho (**Tabela 2: Parâmetros do sistema de condicionamento de ar.**

Parâmetro	Sala	Dormitórios			
		1	2	3	4
Função	Quente/Frio	Frio	Frio	Frio	Frio
Rotação	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Capacidade (Btu/h)	24000	12000	12000	12000	12000
IDRS (Wh/Wh)	6,2	6	6	6	6
Classificação	A	A	A	A	A

NOTA: IDRS = Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal. Fonte: os autores.

Figura 4) foram inseridos na interface *web*.

Tabela 2: Parâmetros do sistema de condicionamento de ar.

Parâmetro	Sala	Dormitórios			
		1	2	3	4
Função	Quente/Frio	Frio	Frio	Frio	Frio
Rotação	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Capacidade (Btu/h)	24000	12000	12000	12000	12000
IDRS (Wh/Wh)	6,2	6	6	6	6
Classificação	A	A	A	A	A

NOTA: IDRS = Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal. Fonte: os autores.

Figura 4: Etiquetas de ar-condicionado dos quartos (à esquerda) e sala (à direita).



Fonte: os autores.

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ÁGUA QUENTE

Para avaliar o Sistema de Aquecimento de Água (SAS) da UH pelo método simplificado da INI-R (2022), estimou-se o consumo de energia elétrica e térmica do sistema de água quente. Por fim, comparou-se o consumo de energia primária necessário para atender à demanda real de água quente com a condição de referência.

Os consumos de energia elétrica nas condições real ($C_{AAE,real}$) e de referência ($C_{AAE,ref}$) foram calculados pelas equações B.III.3.1 e B.III.3.2 da INI-R [7]. Posteriormente, o consumo de energia térmica real ($C_{AAT,real}$) foi estimado pela equação B.III.4 da INI-R [7]. Os consumos totais de energia primária nas condições real ($C_{AA,real}$) e de referência ($C_{AA,ref}$) foram calculados pela equação B.III.2 da INI-R [7].

Para o sistema de água quente sem SAS na edificação, considerou-se exclusivamente o uso de energia elétrica para aquecimento da água. Nesse caso, os resultados de $C_{AA,real}$ e $C_{AA,ref}$ foram iguais, pois a energia térmica requerida para a demanda diária de água quente, determinada pela Equação B.III.8 da INI-R [7], não é contabilizada.

Para o sistema de água quente com SAS, considerou-se o uso exclusivo de energia térmica, com auxílio de placas solares e sistema de acumulação. Nessa situação, os resultados das variáveis $C_{AA,real}$ e $C_{AA,ref}$ também foram iguais, visto que a energia elétrica necessária para a demanda diária de água quente não é contabilizada. Assim, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da avaliação do sistema de água quente.

Condição	Variáveis de consumo	Resultados (kWh/ano)	
		Sem SAS	Com SAS
Real	$C_{AAE,real}$	2061,17	0
	$C_{AAT,real}$	0	509,04
	$C_{AA,real}$	3297,88	559,94
Referência	$C_{AAE,ref}$	2061,17	0
	$C_{AA,ref}$	3297,88	559,94
NOTA: $C_{AA,ref}$ = $C_{AAE,ref}$ + $C_{AAT,ref}$ transformados para energia primária, onde $C_{AAT,ref}$ = 0.			

Fonte: os autores.

AVALIAÇÃO PELO MÉTODO SIMPLIFICADO DA INI-R (2022)

O método simplificado da INI-R (2022) classifica a eficiência energética da edificação com base na redução percentual do consumo de energia primária, comparando o consumo real com um modelo de referência, equivalente à classe C [7].

Para isso, os pré-requisitos e limites dos sistemas da edificação, envoltória, sistema de condicionamento de ar e aquecimento de água, foram analisados. Os parâmetros construtivos e geométricos foram inseridos na interface *web* (**Figura 5**) [17], que utiliza um metamodelo estatístico baseado em simulações termoenergéticas. Isso representa a UH avaliada e adota características de referência para comparação. Assim, a planilha eletrônica calcula o consumo de energia da edificação e sua classificação quanto ao nível de eficiência energética.

Figura 5: Interface *Web* para inserir os dados da edificação.



Fonte: [17], adaptado pelos autores.

RESULTADOS

A seguir, estão descritos os resultados para a classificação da eficiência energética da residência localizada em Betim, MG, conforme o método simplificado da INI-R (2022).

AVALIAÇÃO DA ENVOLTÓRIA

A avaliação do nível de eficiência energética da envoltória da edificação se baseia na previsão dos seguintes parâmetros pelo método simplificado: percentual de horas de

ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperaturas operativas anuais máxima (Tomáx) e mínima (Tomín), e às cargas térmicas de refrigeração (CgTR), aquecimento (CgTA) e total (CgTT). Esses dados foram obtidos pela inserção dos dados e cálculos na interface *web*, resultando nos resultados relacionados à envoltória e ao sistema de condicionamento de ar (**Figura 6**).

Os resultados mostram que a UH mantém a maioria das horas ocupadas na temperatura operativa desejada (PHFT = 95,44%). Os percentuais de horas ocupadas com temperaturas acima (PHsFT = 4,18%) e abaixo (PHiFT = 0,39%) da faixa operativa sugerem um desempenho térmico adequado da envoltória e do sistema de condicionamento de ar da UH para o clima de Betim.

Figura 6: Resultados da envoltória e do sistema de condicionamento de ar.

Resultados

PHFT (%):	95,44
PHsFT (%):	4,18
PHiFT (%):	0,39
CgTR (kWh/ano):	260,94
CgTA (kWh/ano):	93,88
Tomax (°C):	28,27
Tomin (°C):	16,36
Consumo para resfriamento (kWh/ano):	42,68
Consumo para aquecimento (kWh/ano):	90,74

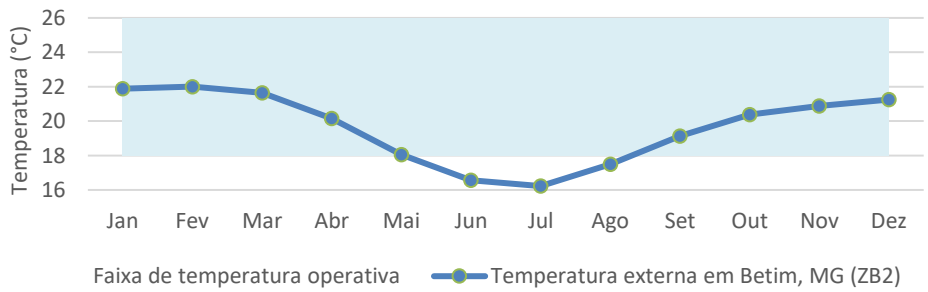
Voltar para a interface do metamodelo

Avançar para as informações complementares da classificação de Eficiência Energética da edificação

Fonte: adaptado de [17].

Os resultados de temperatura operativa anual máxima (Tomax = 28,27 °C) e mínima (Tomin = 16,36 °C) mostram desvios de até 1,64 °C abaixo e 2,27 °C acima da faixa de temperatura operativa esperada para o clima de Betim (entre 18 e 26 °C), conforme exibido na **Figura 7**. Como o PHiFT foi quase nulo, presume-se que a maioria dessas ocorrências ocorreu por desconforto por calor.

Figura 7: Temperatura externa e faixa de temperatura operativa para Betim/MG (ZB2).



Fonte: [17], adaptado pelos autores.

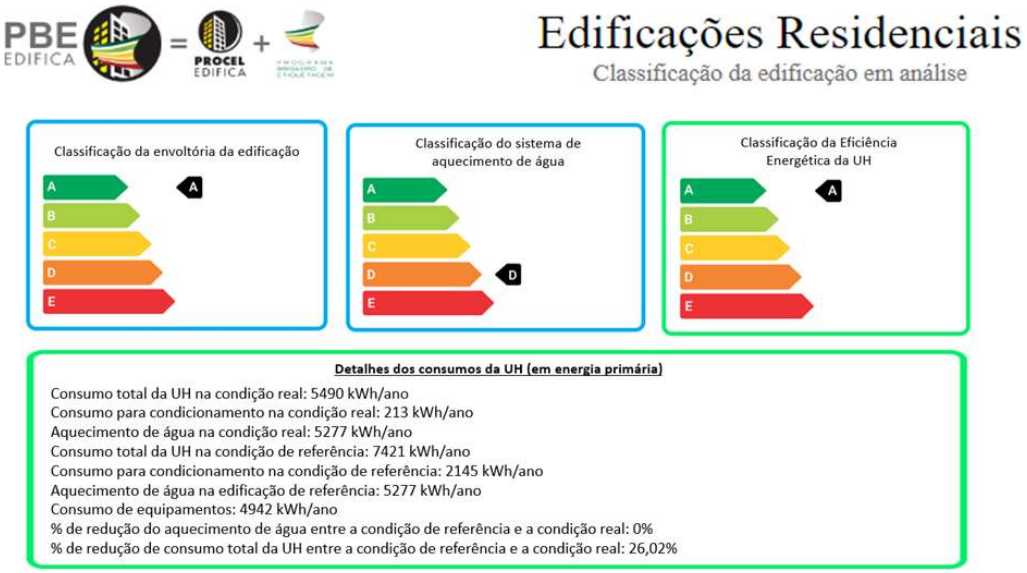
Os parâmetros de carga térmica de aquecimento (CgTA) e refrigeração (CgTR) indicam a necessidade de ambos os sistemas. Porém, a quantidade de calor a ser fornecida ao ar (CgTA = 93,88 KWh/ano) representou 35,6% da quantidade de calor a ser retirada do ar (CgTR = 260,94 KWh/ano) para manter as condições térmicas desejadas. Isso ressalta a importância de estratégias de resfriamento passivo para reduzir o desconforto térmico por calor em Betim. Além disso, destaca-se a necessidade de estratégias de aquecimento passivo para os meses mais frios, considerando que o consumo para aquecimento foi mais alto que o consumo para resfriamento. Nesse sentido, a NBR 152220-3 sugere o uso de ventilação natural cruzada no verão e paredes internas pesadas para inércia térmica de aquecimento, adequadas à ZB2 [15].

CLASSIFICAÇÃO GERAL DA UH

Após integrar os dados do SAS na interface *web* e combiná-los com as informações sobre a envoltória e o sistema de condicionamento de ar, foi possível determinar a classificação energética geral da edificação pela INI-R (2022).

A **Figura 8** mostra os resultados sem o uso do SAS, revelando uma redução significativa de 26,02% no consumo total de energia da UH real em comparação com a condição de referência. Esse ganho pode ser atribuído às estratégias bioclimáticas implementadas na edificação, mostrando-se adequadas para as condições climáticas de Betim (ZB 2). As estratégias incluem o uso de elementos de sombreamento horizontal e vertical, o cumprimento dos requisitos de transmitância térmica e absortância solar dos elementos de vedação externa e a adoção de sistemas de condicionamento artificial eficientes, conforme recomendações de desempenho térmico [15,7]. A experiência dos moradores confirma a eficácia dessas estratégias, relatando uma menor dependência do ar-condicionado para manter o conforto térmico durante o ano.

Figura 8: Resultados de classificação da eficiência energética: sem uso de SAS.

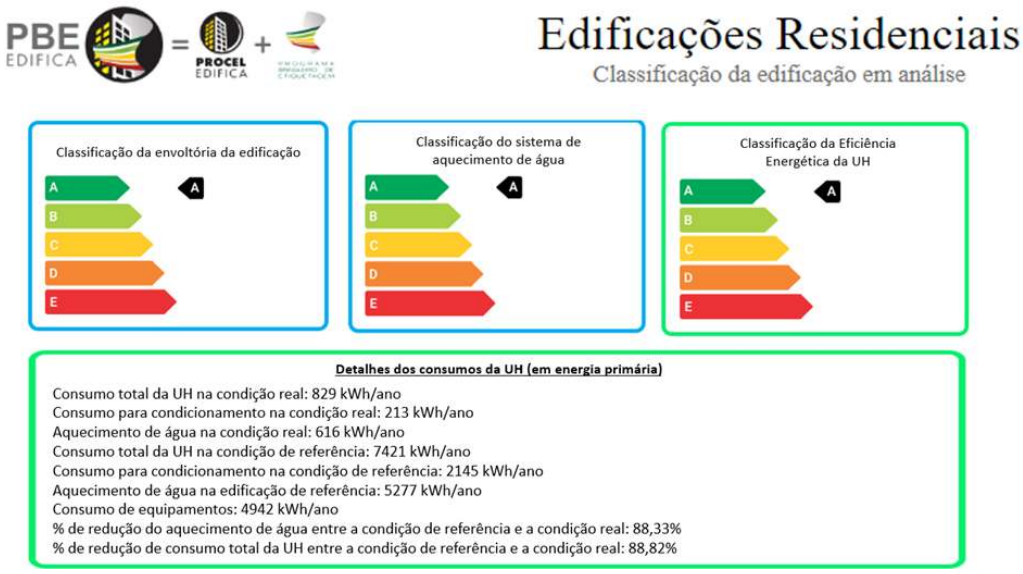


Fonte: PBE edifica (2023).

Na **Figura 9**, são exibidos os resultados da edificação com o uso do SAS. Em ambos os cenários das Figuras 8 e 9, com e sem SAS, os dados relativos à envoltória e ao sistema

de condicionamento de ar permaneceram inalterados, resultando na mesma classificação de eficiência A.

Figura 9: Resultados de classificação da eficiência energética: com uso de SAS.



Fonte: PBE edifica (2023).

A Tabela 4 detalha a comparação dos resultados de ambas as situações. O desempenho térmico da envoltória e do sistema de condicionamento da edificação não foi afetado pela integração do SAS, mantendo constante o consumo de energia para o condicionamento dos ambientes. Assim, a redução no consumo total de energia da UH se deve exclusivamente à redução no consumo para aquecimento de água propiciada pelo SAS.

Tabela 4: Comparação dos resultados gerais de Eficiência Energética da UH.

Avaliação	Parâmetros	Sem SAS	Com SAS
Condição real	Consumo total da UH na condição real [kWh/ano]	5490	829
	Consumo para condicionamento na condição real	213	213
	Aquecimento de água na condição real [kWh/ano]	5277	616
Economia de energia	Redução do consumo de energia pelo uso de placas solares para aquecimento de água	0%	85%

Fonte: os autores.

Nota-se uma redução notável no consumo total de energia primária da UH ao adotar placas solares, indicando a eficácia dessa tecnologia na otimização da eficiência energética. A queda no consumo total de 5490 kWh/ano para 829 kWh/ano representa uma economia de aproximadamente 85%, permitindo elevar a classificação de eficiência energética do SAS de D para A. Essa redução é significativa, pois o aquecimento de água é uma das principais demandas de eletricidade em residências, correspondendo a cerca de 35% do padrão de consumo de eletricidade em habitações no sudeste brasileiro [6]. Assim, a redução no consumo de energia para aquecimento de água não apenas influencia os custos associados ao aquecimento, mas também alivia a carga sobre a infraestrutura elétrica convencional. Essa eficácia das placas solares em utilizar a energia solar para aquecimento de água reflete resultados observados em estudos similares [10-12].

A eficácia SAS na edificação também foi avaliada em comparação com o consumo real de energia elétrica, totalizando 1452 kWh/ano, uma diferença de 623 kWh/ano em relação ao método simplificado. Esta discrepância pode ser atribuída à exclusão de outros aparelhos elétricos presentes na UH, como televisão, geladeira, máquina de lavar roupas e forno elétrico, estimando um consumo adicional mensal de 81,54 kWh/mês. Ao considerar isso junto média mensal calculada pelo método simplificado de 69,08 kWh/mês, aproxima-se do valor de consumo real da UH de 121 kWh/mês. Essa diferença de +29,6 kWh/mês estimada pela INI-R pode ser devido principalmente à falta de dados climáticos específicos de Betim, na interface *Web*, e pela não consideração de condições reais, como os diferentes horários de uso do SAS [12].

Assim, conclui-se que, com o uso de placas solares, a redução no consumo de energia para aquecimento de água é substancialmente maior, indicando uma vantagem clara na utilização dessa tecnologia. Além disso, o método simplificado da INI-R (2022) mostrou-se eficaz para estimar dados de consumo próximos à situação real da edificação, corroborando também com outros estudos [10].

CONCLUSÃO

Este estudo analisou os impactos da energia solar na eficiência energética de uma habitação em Betim, MG, utilizando o Método Simplificado da INI-R (2022), visando avaliar se o Sistema de Aquecimento Solar (SAS) poderia aumentar essa eficiência.

Ambos os cenários resultaram em classificação "A" para a envoltória, refletindo adaptação aos climas locais. A inclusão dos painéis solares melhorou significativamente a classificação do sistema de aquecimento de água de "D" para "A", economizando cerca de 85% de energia para aquecimento de água. Essa redução não só diminui custos operacionais a longo prazo, mas também promove sustentabilidade ambiental e beneficia os ocupantes e a comunidade.

O uso do método simplificado da INI-R mostrou-se viável, sendo uma ferramenta acessível e ágil para avaliação da eficiência energética de habitações com uso de SAS. Portanto, este estudo contribui tanto para aplicações práticas quanto acadêmicas, constatando uma solução real para o alto consumo de energia em habitações e promovendo a conscientização sobre práticas sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo auxílio técnico ao desenvolvimento deste trabalho, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations**: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Paris, 2024.

[2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Estudos da demanda de energia**. Nota Técnica DEA 13/15. Demanda de Energia 2050. EPE: Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf. Acesso em: 29 mai. 2024.

[3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Escassez Hídrica em 2021.** Diagnóstico e oportunidades para o planejamento da expansão da oferta de eletricidade. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-766/NT-EPE-DEE-DEA-001-2023_Escassez_Hidrica_2021_Diagnostico_e_Oportunidades.pdf. Acesso em: 29 mai. 2024.

[4] PEREIRA, E.; MARTINS, F.; GONÇALVES, A.; COSTA, R.; LIMA, F.; RÜTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p.

[5] BRASIL; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço energético nacional 2022:** ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf. Acesso em: Acesso em: 14 abr. 2023.

[6] 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**, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021.

[7] BRASIL; INMETRO. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/ANEXO%20II_INI-R_Portaria%20309_2022_COM%20CAPA.pdf. Acesso em: 10 jun. 2023.

[8] ALTOÉ, L.; COSTA, J. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; MARTINEZ, F. J. R.; FERRAREZ, A. H.; VIANA, L. A. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 285-297, abr. 2017.

[9] 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.

[10] PACHECO, F.; FOSSATI, M. Avaliação de edifícios de energia zero pela nova proposta de etiquetagem residencial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., XX, 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8.

[11] PIEROZAN, E.; SCOLARO, T. P.; WATZKO, E. S.; GHISI, E. Technical and economic feasibility of multi-family social housing and Nearly Zero-Energy Buildings in southern Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2608, 22 mar. 2024.

[12] VAZ, I. C. M.; GERALDI, M.; VECCHI, R. D.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. *Benchmarking* energético dos sistemas de aquecimento de água em habitações de interesse social. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., São Paulo, 2023. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC 2023. p. 1–10.

[13] WEISS, W., SPÖRK-DÜR, M., MAUTHNER, F. Solar Heat Worldwide – Global Market Development and Trends in 2016 /Detailed Market Figures 2015. IEA, 2017.

[14] ÁREA ARQUITETURA. Projeto arquitetônico. Betim, 2014.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de

condicionamento térmico passivo para Habitações de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005.

[16] BRASIL; INMETRO. **Manual RAC**. Catálogo de propriedades térmicas. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Manual%20RAC_Cat%C3%A1logo%20de%20propriedades_DEZ-22.pdf. Acesso em: 10 jun. 2023.

[17] PBE Edifica. **Interface Web**. Método Simplificado. 2022. Disponível em: https://cb3e.sites.ufsc.br/interface?. Acesso em: 11 junho 2023.

[18] ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dec. 2013. Schweizerbart.