ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE 12 HIS NO SUL DO BRASIL

Carolina de Mesquita Duarte (1); Talita Marini Brandelli (2); Marcelo Epiphanio da Rosa (3); Gabriela Wrege Parra (4); Eduardo Grala da Cunha (5)
(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, carolinademesquitaduarte@hotmail.com
(2) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, talitabrandelli@hotmail.com
(3) Arquiteto, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, marceloerosa20@gmail.com
(4) Estudante, Graduanda do Curso de Arquitetura e Urbanismo, gabiwre@gmail.com
(5) PhD, Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, eduardogralacunha@yahoo.com.br, Laboratório de Conforto e Eficiência Energética, Pelotas–RS, 96010-020, Tel.: (53) 3284 5500

RESUMO
A importância do consumo de energia e eficiência energética das edificações se torna cada vez mais evidente, ao passo que este se mostra essencial para uma melhor qualidade de vida do usuário. O presente estudo se concentrou em analisar comparativamente o desempenho térmico de 12 habitações de interesse social através de simulação computacional realizadas no software *EnergyPlus* 9.0.1, considerando-se a zona climática 2 em Pelotas. Os indicadores de desempenho analisados foram, o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), a temperatura operativa anual máxima (Tomáx) e a temperatura operativa anual mínima (Tomín). Tendo isso em vista, foi possível inferir que as residências que possuem significativas alterações quanto a sua composição construtiva inicial, principalmente quando realizada autoconstrução, o desempenho térmico é prejudicado. Outro fator observado foram os materiais de cobertura empregados, e como a telha de fibrocimento em relação à telha cerâmica pode apresentar um pior desempenho no todo. Os resultados finais da análise demonstram, entre outros aspectos, a importância de se ter em vista os diferentes fatores, para o melhor entendimento da eficiência energética da edificação, a fim de poder garantir um melhor conforto térmico para os moradores.

Palavras-chave: simulação computacional, habitação de interesse social, desempenho térmico.

ABSTRACT
The importance of energy consumption and energy efficiency in buildings is becoming increasingly evident, considering essential for a better quality of life for the user. The present study focused on comparatively analyzing the thermal performance of 12 social housing through computational simulation carried out in the EnergyPlus 9.0.1 software, considering climatic zone 2 in Pelotas. The performance indicators analyzed were the percentage of occupancy hours within an operating temperature range (PHFT), the maximum annual operating temperature (Tomax) and the minimum annual operating temperature (Tomin). It was possible to infer that the homes that have significant changes in their initial construction composition, especially when self-built, have impaired thermal performance. Another factor observed was the covering materials used, and as the fiber cement tile regards to the ceramic tile can present a worse overall performance. The final results of the analysis demonstrate, among other aspects, the importance of keeping in mind the different factors, for a better understanding of the energy efficiency of the building, in order to guarantee better thermal comfort for the residents.

Keywords: computer simulation, social interest housing, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda global de energia tem aumentado constantemente, impulsionada pelo crescimento econômico e populacional, bem como pelo melhor acesso à energia em economias em desenvolvimento. Embora esse cenário tenha se modificado no último ano, onde, estima-se uma queda de 5% nessa demanda em razão da pandemia de Covid-19, que afetou de forma significativa a economia mundial, os problemas causados no setor da energia segundo *Word Energy Outlook* 2020 (IEA, 2020), são os maiores causados nos últimos tempos. Os edifícios residenciais e comerciais são responsáveis por cerca de 32% da energia global e quase 10% das emissões diretas de CO2 relacionadas à energia (IEA, 2012).

No Brasil, houve uma redução no consumo final de energia no último ano, com o setor residencial representando 10,8% do consumo total de energia no país. No entanto, o consumo de energia elétrica no setor residencial, juntamente com os setores de alimentos e bebidas e agropecuário, aumentou em mais de 4,0% (BEN, 2021). O consumo de energia elétrica no setor residencial corresponde a 27,6% do consumo total, sendo o segundo maior consumidor, ficando atrás apenas do setor industrial, responsável por um consumo elétrico de 36,6%. A região Sul do país consome 16,1% do total da energia elétrica produzida no país (BEN, 2021).

De acordo com o *Global Status Report – Renewables 2020* (GST, 2020), a eficiência energética foi um dos maiores contribuintes para estabilizar as emissões globais de gases de efeito estufa em 2019. O relatório menciona que melhorias na eficiência energética por meio de tecnologia de projeto, que utilizem materiais e técnicas construtivos adequados e que sejam capazes de promover, por meio de estratégias passivas, o conforto dos usuários com o mínimo de consumo de energia foram um dos principais fatores para a redução do consumo energético nas edificações.

Nesse contexto, diversos estudos, como os desenvolvidos por (BROWN *et al.*, 2014, CICELSKY; MEIR, 2014; ALAIDROOS; KRARTI, 2015; CHARISI, 2017), têm sido desenvolvidos para compreender o comportamento termoenergético das edificações residenciais e buscar novas medidas para minimizar os impactos ambientais causados pela crescente demanda de energia. A simulação computacional tem se mostrado uma importante ferramenta para avaliar e determinar parâmetros mínimos para o desempenho das edificações. Esses resultados podem servir como base para a elaboração e reformulação de normas de regulamentação técnica para projetos arquitetônicos.

O consumo e a eficiência energética das edificações residenciais são influenciados por diversos fatores, como os climáticos, arquitetônicos e os humanos, e esses fatores se complementam. Monteiro (2012) destaca que a importância de se trabalhar o projeto e os materiais construtivos é equivalente, e que a soma desses dois aspectos leva a ganhos de desempenho do edifício. Viana (2019), destaca a importância de o projeto arquitetônico priorizar o desempenho ambiental do edifício, considerando o impacto que esse fator tem sobre o ambiente natural e seus ocupantes.

Algumas das variáveis apontadas como tendo maior influência no desempenho termoenergético das edificações incluem sua geometria, materiais de construção, a utilização de ventilação natural e a eficiência dos sistemas de condicionamento artificial (BAVARESCO *et al.*, 2021). De acordo com Lamberts *et al.* (2014), a forma arquitetônica e a escolha dos materiais pelo projetista têm uma influência significativa no conforto ambiental e no consumo de energia dos edifícios, visto que a organização espacial dos ambientes afeta diretamente os fluxos de ar internos e externos, a quantidade de luz e calor recebidos pelo edifício, e as propriedades térmicas dos materiais, que definem o grau de isolamento térmico e afetam as trocas térmicas entre o interior e o exterior, para manter o ambiente interno confortável para o usuário.

Dalbem *et al.* (2017), destacam a importância de escolher materiais para a envoltória das edificações que sejam adaptados ao clima local, destacando que a negligência desses fatores acaba gerando habitações com baixo desempenho termoenergético. Para Turczyn e Neves (2019), as formas e os materiais empregados nas edificações residenciais, juntamente com os fatores geográficos e climáticos locais, estão diretamente relacionados ao seu desempenho térmico.

O estudo de Santana (2016) abordou a otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais na cidade de São Paulo, como foco no desempenho termoenergético dos modelos. Para isso, foram avaliados indicadores como graus-hora de resfriamento e aquecimento, sendo os parâmetros geométricos mais influentes identificados como área útil, inclinação da cobertura, áreas envidraçadas e áreas de vão de ventilação.

Por sua vez, Pacheco (2016) realizou uma avaliação das condições térmicas de três tipologias de habitações populares (alongada, ramificada e compacta), levando em conta outras estratégias, como ventilação e sombreamento. Foi constatado que a ventilação natural exerceu um papel importante na melhoria do desempenho das habitações, sendo que a tipologia alongada se destacou na maioria dos testes. No entanto, é importante ressaltar que essa tipologia apresentou o pior desempenho em algumas situações, o que evidencia a necessidade de combinar diferentes estratégias em relação à forma e ao clima local.

Balboni *et al*. (2019) realizaram um estudo que analisou a influência dos materiais que compõem a envoltória na performance termoenergética de habitações populares, por meio de uma análise multiobjetivo. A transmitância térmica das paredes externas, do piso e da cobertura, a orientação solar e as absortâncias das paredes externas e da cobertura foram modificadas para a ZB2. Os resultados indicaram que o envelope mais isolado, com maior eixo orientado a Norte e alta absortância apresentou o melhor desempenho entre as opções geradas pela simulação.

E, ainda, Berleze *et al*. (2021) utilizaram a parametrização e otimização multiobjetivo para analisar o impacto da geometria em habitações sociais na região Sul do país. O estudo identificou que a mudança na geometria das edificações pode trazer benefícios significativos e melhorar consideravelmente o desempenho termoenergético, alcançando uma melhora de até 98% no período de verão e 49% no período de inverno com diferentes configurações geométricas.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é fazer uma análise comparativa do desempenho térmico de 12 construções integrantes do estoque edificável de habitações unifamiliares de interesse social da cidade de Pelotas – RS, a partir de simulação computacional, considerando os indicadores de desempenho de percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($\mathrm{PHFT_{UH}}$), temperatura operativa anual máxima ($\mathrm{Tomáx_{UH}}$) e temperatura operativa anual mínima ($\mathrm{Tomín_{UH}}$) da Unidade Habitacional (UH).

3. MÉTODO

O método do trabalho foi dividido em 4 etapas principais: definição do objeto de estudo; caracterização do modelo computacional; simulação dos modelos e resultados.

3.1. Definição do objeto de estudo

O objeto de estudo definido para este trabalho são as habitações populares unifamiliares localizadas na cidade de Pelotas – RS. As 12 habitações representantes de parte do estoque edificável da cidade estão inseridas em Áreas de Especial Interesse Social (AEIS), ou passaram pelo processo de regularização fundiária realizado pela Prefeitura Municipal de Pelotas, ou se enquadram no Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) referente ao financiamento de habitações em grandes empreendimentos ou de forma individual.

Para a seleção dessas habitações, foram conduzidos levantamentos prévios com base no III Plano Diretor de Pelotas (2008), informações fornecidas pela Secretaria de Habitação e Regularização Fundiária de Pelotas (SHRF), bem como pesquisas em jornais e redes sociais das principais imobiliárias e construtoras locais. O objetivo desses levantamentos foi mapear as áreas onde seriam realizados os estudos de campo, nos quais foram coletados dados relativos às habitações e seus moradores.

As habitações selecionadas para este estudo estão localizadas no centro das quadras, com as paredes construídas nos limites laterais dos terrenos e, assim como mostra a Tabela 1, apresentam orientações distintas, são térreas, possuem entre um e quatro dormitórios, um banheiro, sala e cozinha integradas, paredes em alvenaria ou concreto moldado *in loco*, telhas de fibrocimento ou cerâmica e esquadrias de alumínio, madeira ou mistas.

Tabela 1 – Principais características das habitações utilizadas no estudo.

Hab.	Nº Pav.	Nº de dormit.	Nº de banheiros	Sala e Cozinha Integradas	Orientação	Cobertura	Parede	Piso
HAB001	Térrea	2	1	Sim	SUL	Fibrocimento	Alvenaria	Cerâmica
HAB002	Térrea	1	1	Sim	NORTE	Fibrocimento	Alvenaria	Cerâmica
HAB003	Térrea	3	1	Sim	SUL	Fibrocimento	Alvenaria	Laminado
HAB004	Térrea	2	1	Sim	SUL	Fibrocimento	Alvenaria	Laminado
HAB005	Térrea	1	1	Sim	SUL	Fibrocimento	Alvenaria	Cerâmica
HAB006	Térrea	2	1	Sim	NORTE	Cerâmica	Concreto	Laminado
HAB007	Térrea	4	1	Sim	NORTE	Fibrocimento	Alvenaria	Contrapiso
HAB008	Térrea	2	1	Sim	NORTE	Fibrocimento	Alvenaria	Cerâmica
HAB009	Térrea	3	1	Sim	NORTE	Fibrocimento	Alvenaria	Contrapiso
HAB010	Térrea	2	1	Sim	NORTE	Cerâmica	Alvenaria	Cerâmica
HAB011	Térrea	2	1	Sim	NORTE	Cerâmica	Concreto	Laminado
HAB012	Térrea	2	1	Sim	LESTE	Cerâmica	Concreto	Vinílico

A Figura 1 apresenta a planta baixa das 12 habitações, com destaque em vermelho para aquelas que passaram por reformas realizadas pelos próprios moradores. As edificações estão divididas em 4 conjuntos distintos. As habitações 1, 4 e 5 pertencem ao loteamento Amarílis, e contam com projetos desenvolvidos por profissionais habilitados. As habitações 2 e 10 estão localizadas em bairros diferentes, porém ambas possuem projeto desenvolvido por profissionais habilitados. Já as habitações 3, 7, 8 e 9 pertencem ao loteamento PAC-Anglo, sendo que três delas passaram por alterações. Por fim, as habitações 6, 11 e 12 fazem parte do Condomínio Moradas Pelotas 1 e 2, também com projeto desenvolvido por profissional habilitado, sendo que duas delas passaram por reformas realizadas por profissionais habilitados.

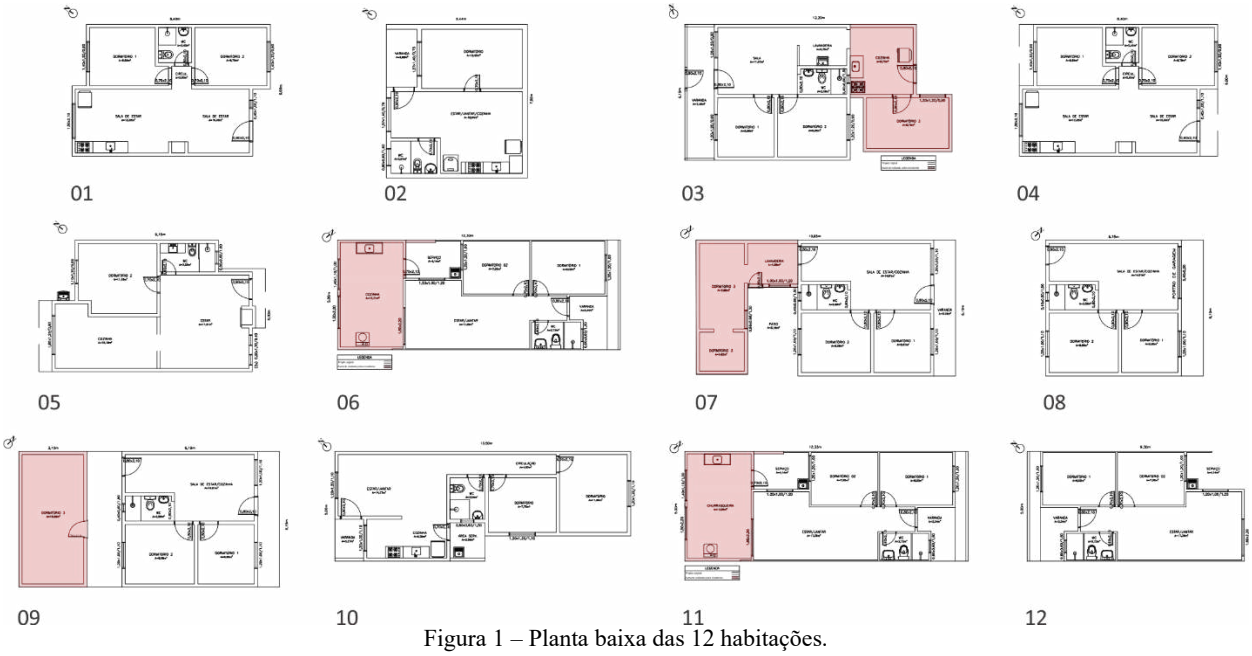


Figura 1 – Planta baixa das 12 habitações.

3.2. Simulação dos modelos

Para as simulações computacionais, as habitações foram modeladas no *software SketchUp* 2017 com o auxílio do *plugin Legacy Open Studio 1.0.14* (Figura 2) e simulados no *EnergyPlus* 9.0.1. A modelagem consiste em criar uma zona térmica para cada ambiente, considerando a medida da face externa da parede ao eixo da parede interna.

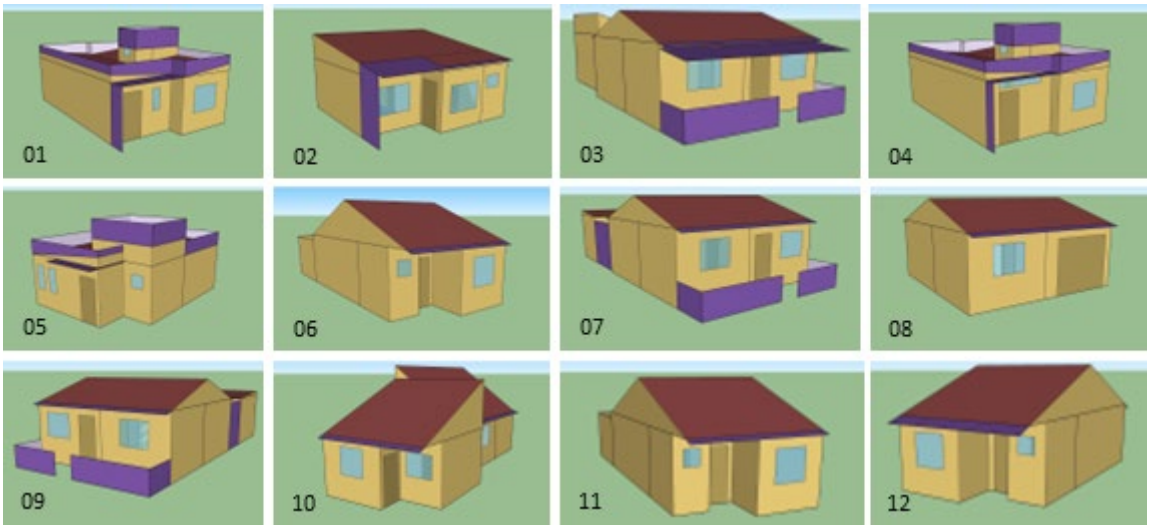


Figura 2 – Perspectivas externas dos modelos de simulação das 12 habitações.

O arquivo climático utilizado nas simulações para representar a Zona Bioclimática 2 foi o referente à cidade de Pelotas-RS, elaborado por Leitzke *et al*. (2018) do tipo .TRY. A caracterização do uso e ocupação da edificação, foi realizada de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2020). Sendo o sistema de ventilação

configurado como naturalmente ventilado com temperatura de *setpoint* de 19ºC, baseada na NBR 15575-1 (ABNT, 2020).

A variável de saída solicitada foi a temperatura operativa interna horária (ºC) de cada um dos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios), a fim de obter os indicadores de desempenho de percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperatura operativa anual máxima (Tomáx) e temperatura operativa anual mínima (Tomín), de cada ambiente e para toda a Unidade Habitacional (UH), a fim de analisar o desempenho destas habitações. Os três indicadores de desempenho consideram apenas as horas de ocupação do ambiente. E, o PHFT utiliza um intervalo de faixa de temperatura operativa de 18ºC a 26ºC de acordo com o clima local para a zona bioclimática 2.

3.3. Caracterização do modelo computacional

As edificações apresentam como sistema construtivo a alvenaria convencional e paredes de concreto moldado *in loco*. As propriedades dos materiais que compõem a envoltória de cada uma das 12 habitações foram calculadas de acordo com o método apresentado na NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e estão exemplificadas da Tabela 2.

Tabela 2 – Principais propriedades da envoltória do melhor e do pior caso.

Hab.	Elemento	Descrição	U [W/(m².K)]	C_T [kJ/(m².K)]	α
HAB001	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e laje (10cm).	2,44	246,56	0,9
HAB002	Parede	Parede de tijolo 9 furos (14x19x29cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	1,90	229,48	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e forro PVC.	2,68	23,08	0,9
HAB003	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento.	2,68	10,08	0,9
HAB004	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e laje (10cm).	2,44	246,56	0,9
HAB005	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e laje (10cm).	2,44	246,56	0,9
HAB006	Parede	Parede em concreto armado moldado in loco (espessura internas = 8cm / externas = 10cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	3,86	340	0,9
	Cobertura	Telha cerâmica, câmara de ar e forro de gesso acartonado.	2,41	27,27	0,9
HAB007	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e forro PVC.	2,68	23,08	0,9
HAB008	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e forro PVC.	2,68	23,08	0,9
HAB009	Parede	Parede de tijolo 6 furos (9x14x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	2,41	172,39	0,9
	Cobertura	Telha fibrocimento, câmara de ar e forro PVC.	2,68	23,08	0,9
HAB010	Parede	Parede de tijolo 10 furos (9x19x19cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	1,90	163,46	0,9
	Cobertura	Telha cerâmica, câmara de ar e laje (8cm).	2,47	200,56	0,9
HAB011	Parede	Parede em concreto armado moldado in loco (espessura internas = 8cm / externas = 10cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	3,86	340	0,9

	Cobertura	Telha cerâmica, câmara de ar e forro de gesso acartonado.	2,41	27,27	0,9
HAB012	Parede	Parede em concreto armado moldado in loco (espessura internas = 8cm / externas = 10cm), argamassa e reboco nas duas faces (espessura = 2,5 cada face).	3,86	340	0,9
	Cobertura	Telha cerâmica, câmara de ar e forro de gesso acartonado.	2,41	27,27	0,9

Com relação às cores das paredes e cobertura, foram consideradas as cores reais das habitações, e assim, determinadas suas absortâncias. A presença de persiana, veneziana ou cortina também foi considerada na configuração dos modelos a partir dos objetos *WindowMaterial:Shade* e *WindowShadingControl*. O material das esquadrias varia para as 12 habitações, já os vidros, foram configurados como temperados e espessura de 3mm para todas as habitações. A Tabela 3 apresenta um resumo da cor, material das esquadrias e presença de persiana, veneziana ou cortina.

Tabela 3 – Cor das paredes, material das esquadrias e presença de persiana, veneziana ou cortina.

Hab.	**Cor das paredes**	**Material janelas/portas**	**Persiana, veneziano ou cortina**
HAB001	Branca / Bege	Alumínio / Madeira	Cortina
HAB002	Cinza escuro	Madeira e Alumínio / Madeira	Persiana PVC
HAB003	Azul claro	Madeira e Alumínio / Madeira	Cortina
HAB004	Verde / Bege	Alumínio / Madeira	Cortina
HAB005	Cinza	Alumínio / Madeira	Cortina
HAB006	Branca / Bege	Alumínio / Madeira e Alumínio	Veneziana alumínio
HAB007	Azul claro	Alumínio / Madeira e Alumínio	Cortina
HAB008	Azul escuro	Alumínio / Madeira e PVC	Cortina
HAB009	Amarelo	Alumínio / Madeira e PVC	Cortina
HAB010	Bege / Palha	Alumínio / Alumínio	Persiana PVC
HAB011	Branca / Bege	Alumínio / Madeira	Veneziana alumínio
HAB012	Coral avermelhada	Alumínio / Madeira e Alumínio	Veneziana alumínio

As configurações de ocupação, taxa metabólica das atividades desempenhadas nos ambientes, padrão de uso e densidade de potência de iluminação e cargas internas de equipamentos, foram configurados de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2020). A ventilação natural seletiva foi adotada, ou seja, o controle da ventilação é dado pela temperatura, onde, a configuração será realizada no objeto *AirFlowNetwork*, com temperatura de *setpoint* de 19ºC, baseada na 15575-1 (ABNT, 2020). E, as propriedades dos materiais que compõem a envoltória foram calculadas de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Para a configuração da ocupação, a NBR 15575-1 (ABNT, 2020) considera o padrão mínimo de duas pessoas por ambientes de permanência prolongada, dormitórios e sala, sendo a sala utilizada pela soma de todos os usuários dos dormitórios. As agendas são as mesmas para os dias da semana e para os finais de semana, de acordo com a porcentagem de ocupantes no horário.

As agendas do padrão de uso de iluminação, seguem a mesma lógica da de ocupação quanto aos dias da semana, finais de semana e ambientes de permanência prolongada. A densidade de potência instalada tanto para o dormitório, quanto para a sala é de 5,0 W/m².

A taxa metabólica depende da atividade desempenhada em cada ambiente, e os valores recomendados pela NBR 15575-1 (ABNT, 2020) consideram o calor produzido para a sala de 108 W, para a atividade sentado ou assistindo tv, e para o dormitório 81 W, para atividade dormindo ou descansando. Já, as cargas internas de equipamentos, são configuradas apenas para a sala, no período de 24 horas e com potência de 120 W.

A temperatura do solo de todos os modelos foi configurada dentro do próprio *EnergyPlus*, de acordo com o manual do *software* (DOE, 2021), através dos objetos *Site:GroundDomain:Slab, SurfaeProperty:OtherSideConditionsModel* e *Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference*, e alterando também no objeto *BuildingSurface:Detailed* os itens *Outside Bounday Condition* e *Outside Bounday Condition Object*.

4. RESULTADOS

Na Figura 3, é possível visualizar os percentuais de horas de ocupação das 12 unidades habitacionais em relação à faixa de temperatura operativa $PHFT_{UH}$. Observa-se que os $PHFT_{UH}$ variam entre 60% e 68%, apresentando uma pequena diferença entre eles. No entanto, é importante ressaltar que esse percentual é relativamente baixo, considerando que as temperaturas operativas estão dentro da faixa recomendada para a região por pouco mais da metade do tempo durante o período de ocupação das habitações.

As habitações 7 e 9, que apresentam os menores $PHFT_{UH}$, possuem cobertura em fibrocimento e paredes em alvenaria. Por outro lado, as habitações 10 e 11, que obtiveram melhores resultados, contam com a cobertura de telha cerâmica e paredes também em alvenaria. Vale ressaltar que as habitações 7 e 9 apresentam a mesma orientação solar e, como fazem parte do mesmo conjunto habitacional, possuem a mesma configuração espacial inicial, com sala e cozinha integradas, dois dormitórios e um banheiro. No entanto, ambas sofrerem adição de compartimentos, sendo que a habitação 7 possui dois dormitórios a mais e uma lavanderia, enquanto a habitação 9 tem apenas um dormitório a mais.

Já as habitações 10 e 11, possuem a mesma orientação solar, com dois dormitórios, um banheiro e sala e cozinha integradas, porém apresentam distribuição espacial diferente, além de um anexo ao fundo na habitação 11. Outro ponto importante é que as habitações 7 e 9 tiveram aumentos criados a partir de autoconstrução, ou seja, os moradores construíram mais dormitórios por conta própria para se ajustar a necessidade da família, já as habitações com melhor percentual têm sua planta completa desenvolvida por profissionais técnicos especializados e com mão de obra qualificada.

Além disso, a diferença de material empregado na cobertura também pode ter influenciado no desempenho das habitações. As habitações com melhor desempenho apresentam telha cerâmica, enquanto as de pior desempenho utilizam telha de fibrocimento, indicando que o desempenho da cobertura tem um papel importante no conforto térmico das habitações.

Como pode ser observado na Tabela 2, apresentada anteriormente, as coberturas com telha de fibrocimento apresentam uma menor capacidade térmica do que as com telha cerâmica, principalmente o modelo com laje, essa capacidade térmica reduzida significa que este material é menos eficiente em absorver e armazenar calor, ou seja, quando recebe calor esse material atinge uma determinada temperatura mais rapidamente e perde calor de forma mais acelerada para o ambiente. A maior densidade do sistema com telha cerâmica contribui para o isolamento capacitivo da cobertura o que pode colaborar para o melhor desempenho das habitações que apresentam este tipo de material aplicado.

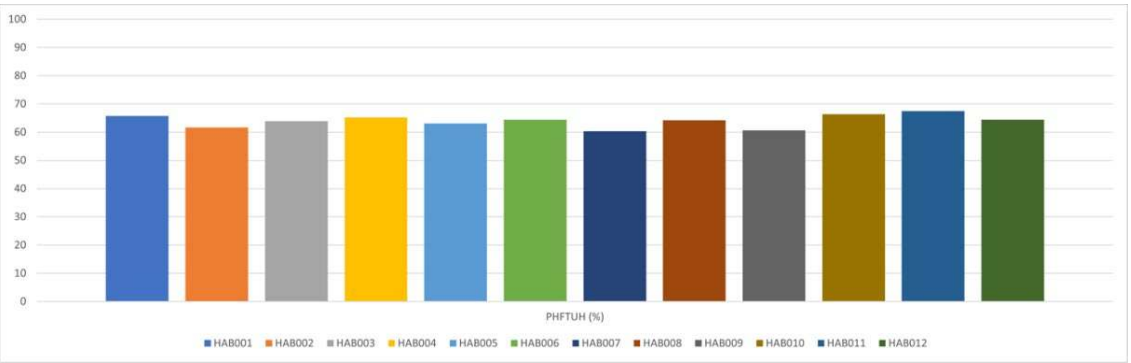


Figura 3: Gráfico do $PHFT_{UH}$ de cada uma das 12 habitações.

A Figura 4 apresenta o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa dos ambientes de permanência prolongada $PHFT_{APP}$ para cada uma das 12 habitações, neste gráfico observa-se que, em geral, as salas dos modelos apresentam um $PHFT_{APP}$ menor que os dormitórios, variando em torno de 55% e 65%, já o dormitório 1, que está presente em todas as habitações, fica entre 65% e 69%, ou seja, dentro dos horários de ocupação destes ambientes o dormitório 1 apresenta melhor desempenho que a sala. Considerando que a avaliação é feita levando em conta apenas o período de ocupação destes ambientes, e que o dormitório é utilizado no turno da noite, onde as temperaturas são mais amenas, possivelmente esse ponto contribui para que a temperatura se mantenha dentro da faixa indicada por um período maior, resultando no aumento do percentual de horas dentro da faixa de temperatura.

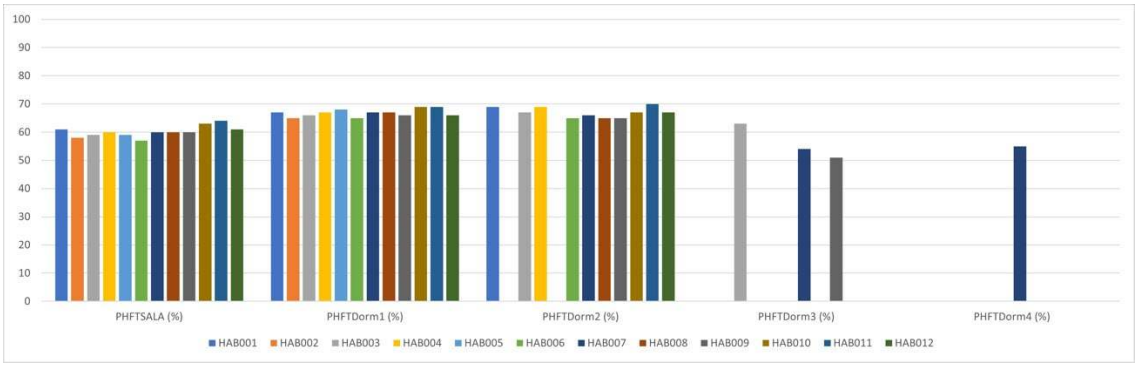


Figura 4: Gráfico do PHFT_{APP} dos ambientes de permanecia prolongada de cada uma das 12 habitações.

Na Figura 5 são apresentadas as temperaturas operativas máximas (Tomáx_{HU}) e mínimas (Tomín_{HU}) das 12 unidades habitacionais. O gráfico mostra que as temperaturas máximas variam entre 27ºC e 36ºC, enquanto as mínimas ficam entre 7ºC e 13ºC, apresentando uma variação significativa, especialmente nas máximas, o que indica que a maior deficiência em relação ao desempenho térmico das habitações pode estar relacionada ao aquecimento.

As habitações 3 e 7 apresentam as maiores máximas, enquanto as habitações 7 e 9 apresentam a menores mínimas. Todas as três habitações fazem parte do mesmo conjunto habitacional e possuem cobertura em fibrocimento e paredes em alvenaria. Elas possuem a mesma configuração espacial inicial, onde, as habitações 7 e 9 tem suas fachadas principais voltadas a norte e mantiveram a planta original, apenas adicionando mais ambientes anexos, já a habitação 3 apresenta sua fachada principal voltada a sul e substitui a cozinha integrada à sala pela lavanderia junto à sala e ampliou para os fundos uma cozinha maior e mais um dormitório.

O gráfico também mostra que as habitações 3 e 7 apresentam uma maior amplitude térmica em relação a suas Tomáx_{HU} e Tomín_{HU}, indicando que as trocas de calor entre exterior e interior acontecem de forma mais acentuada nestas habitações.

A menor densidade e capacidade térmica reduzida do sistema com telha de fibrocimento pode não contribuir de forma direta para a amplitude térmica do ambiente, no entanto, estas características significam que este material absorve menos calor a medida que sua temperatura aumenta, levando menos tempo para conduzir o calor, aumentando assim, as trocas térmicas entre exterior e interior. Durante o verão, quando a temperatura externa está elevada, a telha de fibrocimento conduz mais facilmente o calor, contribuindo para o aquecimento do ambiente interno. Já no inverno, quando a temperatura externa está mais baixa, a telha perde calor do interior para o exterior, fazendo com que a temperatura interna também diminua.

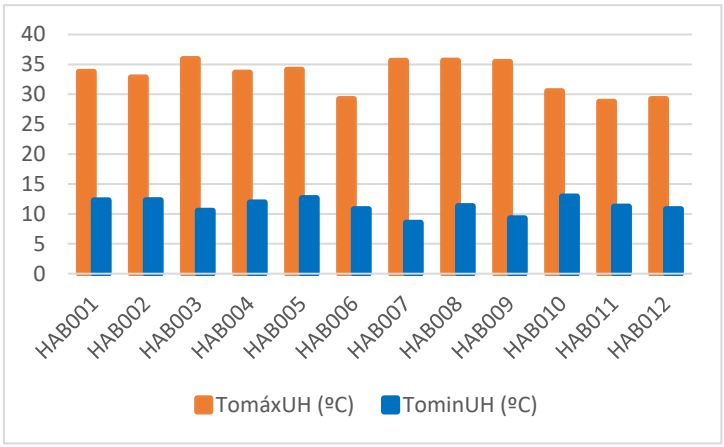


Figura 5: Gráfico da Tomáx_{UH} e Tomín_{UH} de cada uma das 12 habitações.

As Figuras 6 e 7 apresentam as temperaturas operativas máximas ($\text{Tomáx}_{\text{APP}}$) e mínimas ($\text{Tomín}_{\text{APP}}$) dos ambientes de permanência prolongada das 12 habitações. É importante destacar que as $\text{Tomáx}_{\text{APP}}$ da sala são maiores do que as do dormitório 1 em praticamente todas as habitações. Da mesma forma, as $\text{Tomín}_{\text{APP}}$ se mantêm mais altas na sala do que nos dormitórios. Esse padrão pode estar relacionado a alguns fatores, como a exposição solar, a ventilação e a presença de equipamentos elétricos.

Os valores de $\text{Tomáx}_{\text{APP}}$ da sala variam de 28ºC a 36ºC, enquanto as $\text{Tomín}_{\text{APP}}$ ficam entre 12ºC e

13ºC. No dormitório, as temperaturas variam entre 28ºC e 33ºC ($\text{Tomáx}_{\text{APP}}$) e 11ºC e 13ºC ($\text{Tomín}_{\text{APP}}$). É interessante destacar que as variações das temperaturas operativas máximas e mínimas são maiores na sala do que nos dormitórios, o que sugere uma maior influência dos fatores externos na temperatura desse ambiente.

É valido mencionar que o dormitório é utilizado durante a noite, período em que as temperaturas são naturalmente mais baixas na região analisada. Isso contribui para uma temperatura interna mais baixa nesse compartimento durante o período de ocupação.

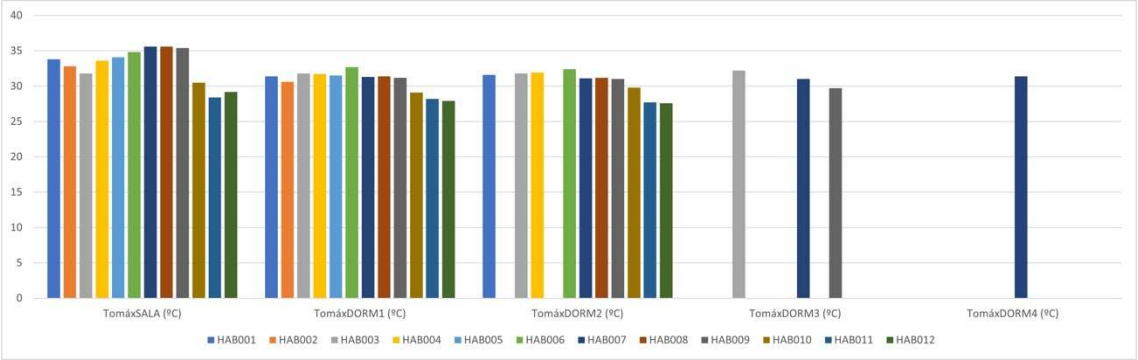


Figura 6: Gráfico da $\text{Tomáx}_{\text{APP}}$ dos ambientes de permanecia prolongada de cada uma das 12 habitações

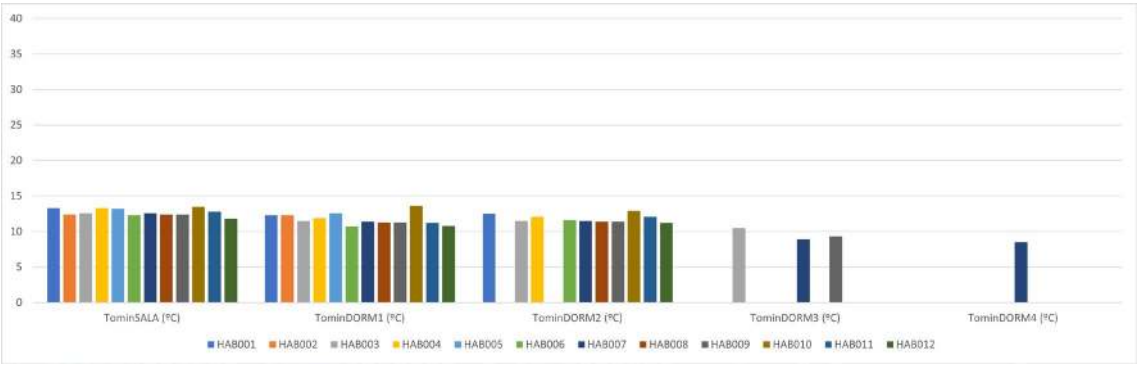


Figura 7: Gráfico da $\text{Tomín}_{\text{APP}}$ dos ambientes de permanecia prolongada de cada uma das 12 habitações.

5. CONCLUSÕES

A análise dos dados apresentados revela que as habitações avaliadas tiveram um desempenho térmico relativamente baixo. Durante o período de ocupação, as temperaturas operativas estiveram dentro da faixa recomendada para a região por pouco mais da metade do tempo. A maioria das habitações com os melhores resultados contam com cobertura de telha cerâmica e distribuição espacial planejada e executada por profissionais técnicos especializados. Em contrapartida, as habitações com piores resultados possuem telha de fibrocimento e foram construídas com aumento por autoconstrução.

Os resultados sugerem que a principal deficiência em relação ao desempenho térmico das habitações pode estar relacionada ao sistema construtivo da cobertura, pois as edificações com piores resultados apresentam telha de fibrocimento e maiores temperaturas internas. Além disso, os dormitórios apresentam um melhor desempenho térmico do que as salas, possivelmente devido ao fato de que são usados durante a noite, quando as temperaturas são mais amenas.

Conclui-se, portanto, que a cobertura das habitações desempenha um papel importante no conforto térmico, mas também é interessante notar que a adição de compartimentos por meio de autoconstrução pode prejudicar o desempenho destas edificações. Pois, a distribuição espacial também é um fator importante no desempenho das habitações analisadas. Por fim, é fundamental buscar soluções para melhorar o desempenho térmico das habitações de interesse social, a fim de garantir o conforto térmico dos moradores por um período mais longo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte I: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

ALAIDROOS, A.; KRARTI, M. **Optimal design of residential building envelope systems in the Kingdom of Saudi Arabia, Energy and Buildings**, v. 86, p. 104-117, 2015.

BALBONI, M. D.; LEITZKE, R. K.; MACIEL, T. S.; CUNHA, E. G.; RHEINGANTZ, P. A. Geração de uma população inicial para análise multiobjetivo de simulações termoenergéticas em HIS. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 2019. João Pessoa. **Anais** [...] Porto Alegre: ANTAC, 2019. v. 1. p. 1874-1883.

BAVARESCO, M. V.; CUCHIVAGUE, H. Y. O.; SCHINAZI, A.; GHISI, E. **Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 263-292, jan./mar. 2021.

BEN 2020 – **Balanço Energético Nacional 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: abr. 2022.

BERLEZE, A. S.; BRASILEIRO, A. de B. H.; SILVOSO, M. M. Multi-objective optimization of the geometry of single-family housing to improve termal performance. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 41-65, abr./jun. 2021.

BROWN, N.; UBBELOHDE, M. S.; LOISOS, G.; PHILIP, S. **Quick Design Analysis for Improving Building Energy Performance**. Energy Procedia, v. 57, p. 1868–1877, 2014.

CHARISI, S. **The role of the building envelope in achieving nearly-zero energy buildings (nZEBs).** Procedia Environmental Science, v. 38, p; 115-120, 2017.

CICELSKY, A.; MEIR, I. A. **Parametric analysis of environmentally responsive strategies for building envelopes specific for hot hyperarid regions**. Sustainable Cities and Society, 2014.

DALBEM, RENATA; CUNHA, EDUARDO GRALA DA; ROMEU, VICENTE; OLIVEIRA, RUI; FIGUEIREDO, ANTÔNIO. **Análise de sensibilidade para elevar o nível de eficiência energética de uma Habitação de Interesse Social na Zona Bioclimática 1.** IN: XIV ENCAC e X ELACAC, 2017, Camboriú. HABITAT HUMANO: EM BUSCA DE CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE NO SÉCULO XXI, 2017. p. 1398-1407.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm. Acesso em: abril de 2021.

GSR 2020 - **Global Status Report** – Renewables 2020. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf.> Acessado em: out. 2020.

IEA. **Key World Energy Statistics**. Paris. 2012. Disponível em: <http://www.iea.org//reports/energy-technology-perspectives-2012>. Acesso em: jan. 2021.

IEA. **World Energy Outlook**. Paris. 2020. Disponível em: < https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. Acesso em: abr. 2022.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: PW Editores, 2014.

LEITZKE, R. K.; BELTRAME, C. M.; FREITAS, J. R.; SEIXAS, J. N.; MACIEL, T. S.; CUNHA, E. G.; RHEINGANTZ, P. A. **Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case. Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, p. 741-756, 2018.

MONTEIRO, VERNER MAX LIGER DE MELLO. **Por uma moradia termicamente confortável: proposta de habitação de interesse social com ênfase no conforto térmico**. 2012. 141 p. Dissertação (Mestrado em Conforto no Ambiente Construído; Forma Urbana e Habitação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PACHECO, G. H. S. **Determinação de recomendações bioclimáticas para habitação de interesse social de quatro climas do Rio Grande do Norte.** Natal, 2016. 131 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SANTANA, LAILA OLIVEIRA. **Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos.** 2016. 81 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Viçosa; MG, 2016.

TURCZYN, D. T. ; NEVES, L. O. **Avaliação de Desempenho Térmico de uma Residência através de Simulações com o EnergyPlus.** Intellectus, Revista acadêmica digital da faculdade de jaguariúna, v. 52, p. 24-40, 2019.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).