

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Temas Emergentes em Sustentabilidade

SISTEMA HÍBRIDO SOLAR E GEOTÉRMICO VERSUS OS MATERIAIS DA EDIFICAÇÃO

HYBRID SOLAR AND GEOTHERMAL SYSTEM VERSUS BUILDING MATERIALS

Roberta Mulazzani Doleys Soares e Gihad Mohamad

RESUMO

Com as preocupações ambientais em constante ascensão, a busca por alternativas sustentáveis e eficientes para atender às demandas de energia tornou-se uma prioridade global. Nesse contexto, os sistemas híbridos que combinam energia solar e geotérmica emergem como uma solução promissora. A transição de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis para fontes renováveis é uma necessidade premente para mitigar as mudanças climáticas e garantir um futuro sustentável.

Palavras-Chave: Sistema híbrido, geotérmico, materiais, envoltória

ABSTRACT

Os sistemas híbridos, ao integrarem a energia solar, abundante em regiões como o Brasil, com a geotermia, tornam-se uma alternativa viável para o alcance desse objetivo. No entanto, o êxito desses sistemas no que se refere a climatização de ambientes, está associada a uma edificação composta de materiais adequados. Desta forma, a presente pesquisa visou avaliar o impacto dos fechamentos no desempenho de um sistema híbrido solar e geotérmico.

Keywords: Hybrid system, geothermal, materials, envelope

SISTEMA HÍBRIDO SOLAR E GEOTÉRMICO VERSUS OS MATERIAIS DA EDIFICAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Com as preocupações ambientais em constante ascensão, a busca por alternativas sustentáveis e eficientes para atender às demandas de energia tornou-se uma prioridade global. Nesse contexto, os sistemas híbridos que combinam energia solar e geotérmica emergem como uma solução promissora.

A transição de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis para fontes renováveis é uma necessidade premente para mitigar as mudanças climáticas e garantir um futuro sustentável. Os sistemas híbridos, ao integrarem a energia solar, abundante em regiões como o Brasil, com a geotermia, tornam-se uma alternativa viável para o alcance desse objetivo. No entanto, o êxito desses sistemas no que se refere a climatização de ambientes, está associada a uma edificação composta de materiais adequados.

A escolha apropriada dos fechamentos das edificações exerce um papel fundamental no que diz respeito ao desempenho e ao conforto térmico, bem como no contexto geral da eficiência energética das construções. Os fechamentos, que incluem paredes, janelas, piso e cobertura, desempenham um papel crucial na contenção ou liberação de calor, influenciando diretamente a demanda por aquecimento e resfriamento.

Desta forma, a presente pesquisa visou avaliar o impacto dos fechamentos no desempenho de um sistema híbrido solar e geotérmico, pois a definição por materiais adequados e sistemas de vedação eficientes não apenas melhora a eficácia de atuação do sistema híbrido, reduzindo as perdas de calor ou ganhos indesejados, mas também contribui para ambientes mais satisfatórios termicamente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos anos, a busca por soluções energéticas sustentáveis tem impulsionado pesquisadores a explorar sistemas híbridos inovadores que combinam múltiplas fontes de energia. Baseado nisso, nesta seção, aborda-se alguns trabalhos recentes e relacionados com a área.

Obalanlege et al. (2020) conduziram uma análise em um sistema fotovoltaico-térmico (FVT) com bomba de calor, visando o aquecimento de ambientes e a geração de eletricidade residencial em Belfast, Reino Unido. O FVT converte luz solar em calor e eletricidade, aquecendo o ambiente com parte da água que circula pelo painel. Simulações numéricas e experimentais revelaram que o aumento da vazão de água de 3L/min para 17L/min resultou em um aumento na eficiência do painel, de 61% para 64,5%. O COP dos sistemas de aquecimento atingiu um valor mínimo de 4,2, indicando alto desempenho.

Calise et al. (2020) realizaram uma análise energética e econômica de um sistema híbrido solar-geotérmico em um edifício comercial no sul da Itália. Este sistema incluiu um Ciclo Orgânico Rankine, chiller de absorção, dutos geotérmicos, coletor solar, aquecedor de biomassa e armazenamento de íon-lítio. Utilizando simulações computacionais com o software TRNSYS, eles alcançaram uma economia de energia primária de 94,54%. A análise de conforto térmico, baseada no método de Fanger, mostrou que o percentual máximo de usuários insatisfeitos foi de 7,26%.

Zarei et al. (2020) conduziram um estudo semelhante a Obalanlege et al. (2020), investigando um sistema híbrido de resfriamento e aquecimento solar com coletor térmico fotovoltaico para residências. Utilizando modelagem matemática e simulações computacionais

com o *software Engineering Equation Solver* (EES), eles observaram que o aumento da vazão da água aumentou a eficiência do painel. Além disso, identificaram a capacidade de elevar a temperatura da água em 9°C com o apoio de um condensador e uma resistência elétrica.

Liang (2020) apresentou um sistema de climatização composto de um piso radiante e dutos subterrâneos com circulação de água, o qual foi aplicado em uma edificação de aproximadamente 70m², localizada em Xining (China), sendo um local com invernos rigorosos e verões amenos. Os resultados mostraram que o sistema com controle otimizado, baseado na temperatura interna e umidade, além de ser limitado pela escala Fanger, promoveu conforto térmico e eficiência energética, operando por 7,3 horas e consumindo 110,3 kWh.

Li, Liu e Zhang (2021) avaliaram o desempenho de um sistema híbrido composto por um coletor solar a ar, insuflador e piso radiante para aquecimento em regiões frias. Implementado em uma sala de 6m×3m×3m, o coletor solar atuou como fonte de calor para todo o sistema, resultando em melhorias nas condições internas, com a temperatura operativa variando de 18°C a 20,9°C.

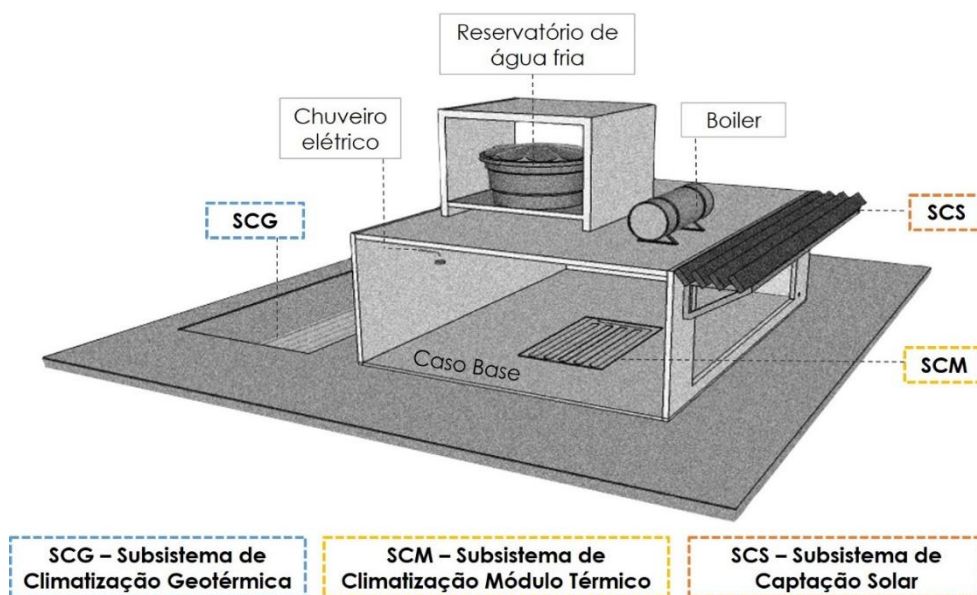
Todos esses estudos mostram a diversidade de abordagens e tecnologias disponíveis para melhorar a eficiência energética e o conforto térmico por meio de sistemas híbridos inovadores, contribuindo para a busca por soluções mais sustentáveis.

3 METODOLOGIA

3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO

A figura 1 é uma representação esquemática do sistema híbrido solar e geotérmico. É importante ressaltar que esta ilustração não aborda aspectos hidráulicos ou mecânicos detalhados, o foco é a descrição dos subsistemas que desempenham um papel no aquecimento da água para consumo e no condicionamento térmico de ambientes.

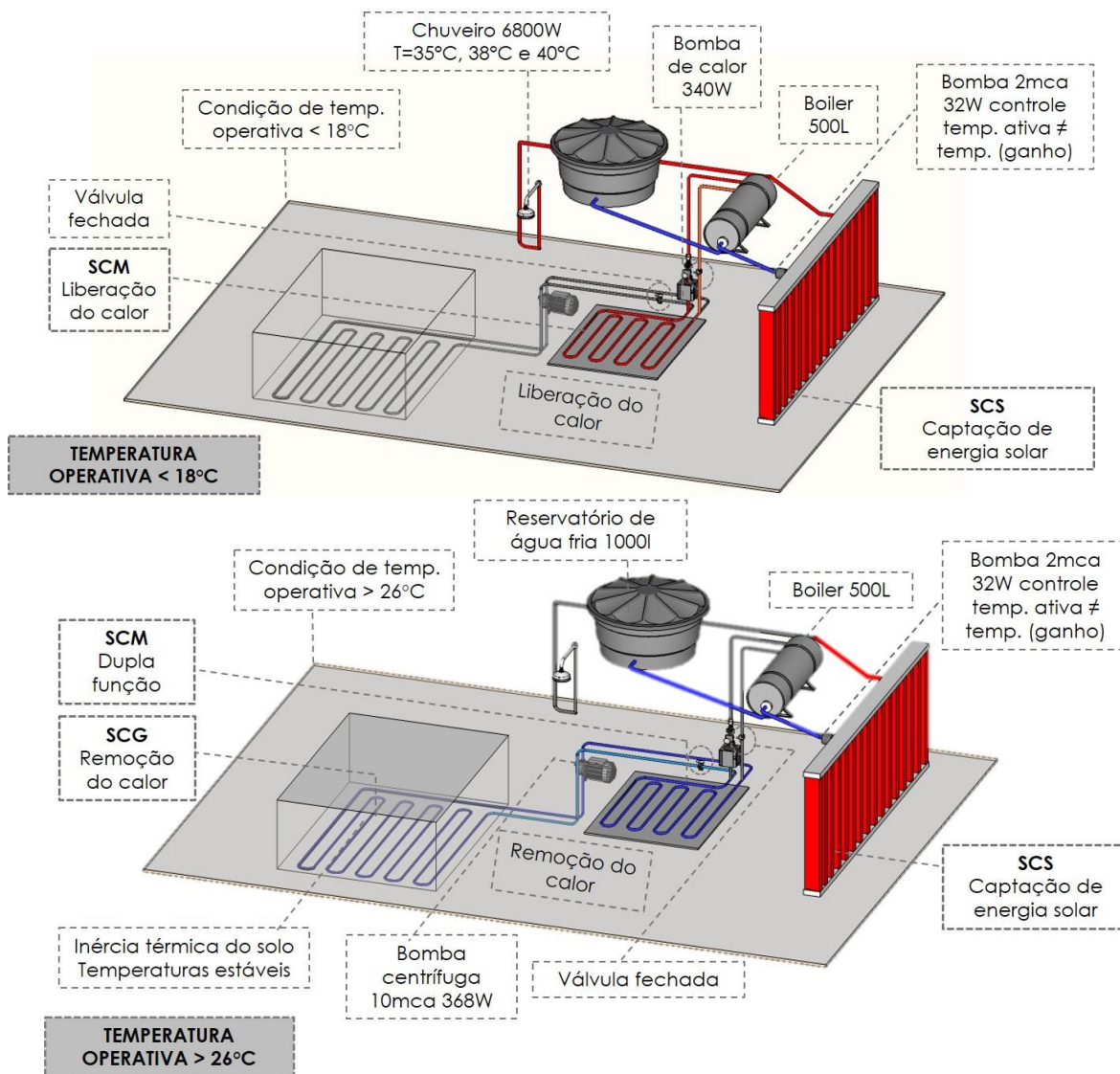
Figura 1 – Representação esquemática do sistema híbrido no caso base



Fonte: Autora (2021).

Na figura 2, é apresentada uma representação esquemática das condições de operação do sistema híbrido em situação de frio e calor. Isso evidencia que o funcionamento do SCM está intrinsecamente vinculado às variações da temperatura operativa.

Figura 2 - Sistema híbrido em condições adversas



Fonte: Autora (2021).

Observa-se que o reservatório de água fornece água fria ao boiler, e desse reservatório térmico, a água direciona-se para o SCS. Essa transferência de calor só ocorre quando a temperatura da água no SCS é superior à água no boiler.

O SCS é constituído pelos brises, que assumem a forma de placas solares e servem como elementos arquitetônicos de proteção solar, naturalmente expostos à radiação solar. Seu propósito é aproveitar a energia térmica incidente e transferi-la para a água. O fluido aquecido pelo SCS é retido no boiler, que distribui a água quente tanto para o chuveiro quanto para o SCM, que regula a climatização do ambiente.

O SCM possui uma função dupla, pois não apenas circula a água quente proveniente do boiler, mas também permite a circulação da água fria vinda do SCG, cuja temperatura é influenciada pelas características do solo, uma vez que o fluido percorre dutos enterrados

horizontalmente. Em situações em que a temperatura ambiente está abaixo de 18°C, a bomba de circulação de água é ativada para que o módulo térmico libere calor para o ambiente. Nesse momento, a válvula de retenção em direção ao boiler é aberta, enquanto a válvula de retenção no circuito geotérmico permanece fechada, permitindo que o fluido aquecido proveniente do boiler circule pelas serpentinas, liberando calor e retornando ao reservatório térmico.

Por outro lado, quando a temperatura ambiente excede os 26°C, a bomba do SCG é acionada e a válvula de retenção desse circuito se abre, permitindo a circulação da água pelos dutos enterrados para reduzir a temperatura do fluido. Isso permite que o SCM circule a água em condições ideais para a remoção de calor do ambiente. É importante destacar que os dutos enterrados aproveitam a alta inércia térmica do solo para promover o resfriamento.

As bombas presentes no sistema híbrido foram dimensionadas com base em critérios como altura de recalque, altura de sucção, perdas de carga, diâmetro interno da tubulação, comprimento e vazão. Além disso, o sistema híbrido incorporou uma bomba de calor com capacidade de 340W, que desempenha um papel adicional no aquecimento da água e na circulação do fluido.

As características dos subsistemas, bomba de calor e boiler presentes no sistema híbrido estão detalhadas na tabela 1, enquanto a tabela 2 apresenta informações sobre os materiais e propriedades termofísicas do módulo térmico.

Tabela 1 - Características dos subsistemas

Subsistema	Características
SCS	* Fator de eficiência óptica de 0,77; * Coeficiente global de perdas de 4,27; Vazão de 35l/h; Cobertura de vidro; Dimensão do coletor na condição Norte: 0,3mx8,0m; área unitária de 2,4m ² ; área total de 9,6m ² ; Dimensão do coletor na condição Leste, Oeste, Nordeste (NE) e Noroeste (NO): 0,3mx2,2m; área unitária de 0,66m ² ; área total de 10,56m ² .
SCM	Revestimento cerâmico: 5mm; Argamassa de assentamento: 5mm; Tubulação de cobre diâmetro 22mm, 11,7m lineares e 0,15m de espaçamento, espaçamento de 15cm; Argamassa de contrapiso: 60mm; Poliestireno expandido: 20mm; Laje de concreto: 100mm. Vazão de 2x10 ⁻⁵ m ³ /s.
SCG	Tubulação de cobre com diâmetro de 22mm, comprimento de 20m e profundidade de 4,5m. Vazão de 2x10 ⁻⁴ m ³ /s.
Bomba de calor	340W
Boiler	500l

Fonte: *INMETRO (2020).

Tabela 2 - Materiais e propriedades termofísicas do módulo térmico

Material	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)
Cerâmico	1,05	2000	920
Argamassa	1,15	2000	1000
Poliestireno expandido	0,04	25	1420
Laje de concreto	1,75	2300	1000

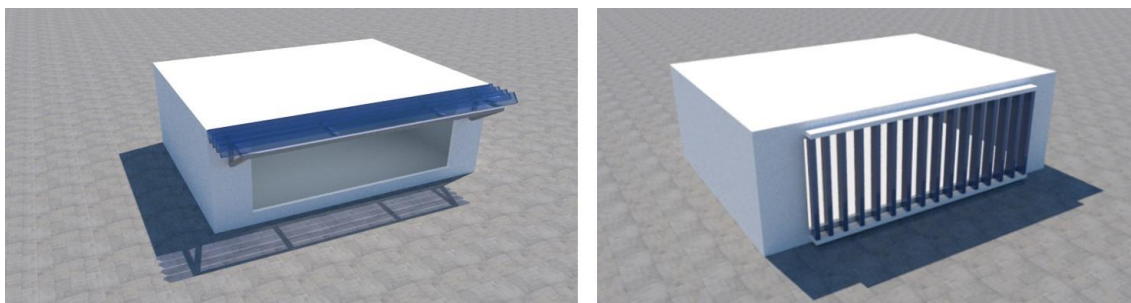
Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Os tipos de brises foram selecionados com base na orientação solar, sendo o brise horizontal, com uma área coletora horizontal de 9,6m², instalado na direção Norte, enquanto os

brises verticais, com uma área coletora vertical de 10,56m², foram adotados nas orientações Leste, Oeste, Nordeste (NE) e Noroeste (NO).

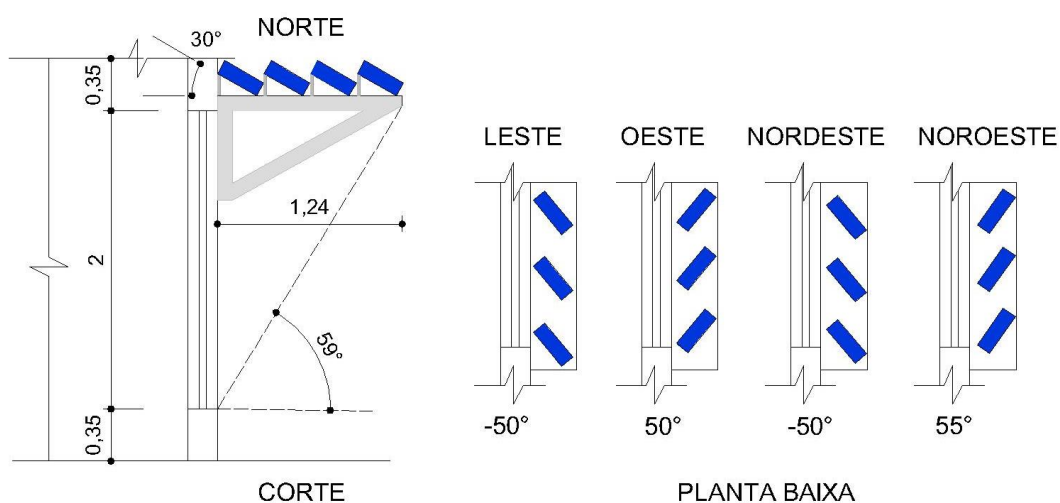
A figura 3 mostra o caso base, destacando a presença dos brises horizontais e verticais. Para uma visão mais detalhada da disposição e layout dos brises, o corte e a planta baixa desses dispositivos estão apresentados na figura 4.

Figura 3 - Perspectiva do caso base com brise-placa horizontal e vertical



Fonte: Autora (2021).

Figura 4 – Corte e planta baixa dos brises-placas



Fonte: Autora (2021).

A definição dos ângulos finais empregados nos brises-placas foi baseada na análise de eficiência e no seu efeito sobre os graus-horas de aquecimento (GHA), decorrente da variação da radiação solar incidente na superfície da janela. Essas orientações levaram à seleção dos seguintes ângulos para o SCS: α de 30° para o Norte, β de -50° para o Leste, β de 50° para o Oeste, β de -50° para o Nordeste (NE), e β de 55° para o Noroeste (NO).

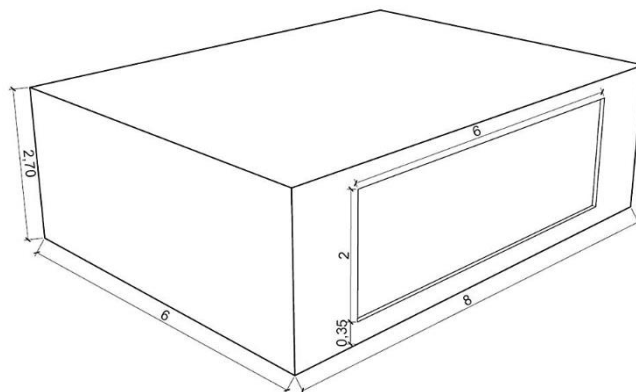
3.2 CARACTERÍSTICAS DO CASO BASE

O modelo empregado nas simulações foi elaborado de acordo com as diretrizes do *Case 600* da norma *ASHRAE Standard 140*, trata-se de um ambiente padrão no qual o sistema híbrido foi aplicado para fins de avaliação de sua performance. É importante observar que o *Case 600* originalmente incluía duas janelas, cada uma com uma área envidraçada de 6m². No

entanto, para fins do estudo, optou-se por consolidá-las em uma única superfície envidraçada com 12m², conforme ilustrado na figura 5.

As informações detalhadas sobre os materiais e as propriedades termofísicas do caso base podem ser encontradas na tabela 3. Destaca-se que a avaliação do sistema híbrido ocorreu no caso base considerando duas configurações de fechamentos.

Figura 5 – Caso base



Fonte: Adaptada de ASHRAE (2012).

Tabela 3 – Materiais e propriedades termofísicas do caso base e caso base isolado

Caso base				
Componente da edificação	Materiais utilizados	Transmitância Térmica (W/m ² .K)	Capacidade Térmica (kJ/(m ² .K)	Cor/ Absortância solar
	Composição dos materiais			
Paredes Externas	Tijolo cerâmico 6 furos circulares (10x15x20cm), espessura argamassa de emboço de 2,5cm, espessura argamassa de assentamento de 1cm. Tijolo assentado nos 15cm.	1,92	202	Branco 15,8
Cobertura	Telha cerâmica e laje maciça de 10cm	2,05	238	Amarelo terra 68,6
Janelas	Vidro simples - taxa de infiltração de 0,5 ren/h	5,75	-	-
Caso Base Isolado				
Paredes Externas	Argamassa externa (2,5cm), bloco de concreto 2 furos (9x19x39cm), EPS (4cm), argamassa interna (2,5cm).	0,74	209	Branco 15,8
Cobertura	Telha metálica 0,1cm, poliestireno (isopor) 4,0cm, telha metálica 0,1cm, câmara de ar (>5,0cm) e laje maciça 10cm	0,68	229	Branco 15,8
Janela	Vidro de controle solar (6mm) + ar seco (12mm) + Vidro Laminado incolor (6mm). Esquadria de PVC com vedação - fluxo de ar de 1x10 ⁻⁴ kg/s.m	2,8	-	-

Fonte: Soares (2014), Liddament (1986), Weber et al. (2017) e Dornelles (2008).

3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Foi utilizado o *software EnergyPlus* 8.9.0 para as simulações computacionais, com o auxílio do *Sketchup 17 Make* e do *plugin Euclid* 0.9.3 para a interface gráfica. Consideraram-se os dados climáticos da cidade de Santa Maria-RS, representados pelo *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA).

Diante disso, o ambiente padrão foi posicionado nas orientações Norte, Leste, Oeste, Nordeste e Noroeste a fim de verificar as condições reais do espaço sem e com a intervenção do sistema híbrido. Para isso, obteve-se a temperatura operativa para o cálculo dos graus-hora de resfriamento (GHR) e aquecimento (GHA), calculados com a utilização das Equações 1 e 2, as quais foram determinadas de acordo com o RTQ-R (INMETRO, 2012) e Sorgato (2009), respectivamente.

$$GHR = \sum (To - 26^{\circ}C) \quad (1)$$

$$GHA = \sum (18^{\circ}C - To) \quad (2)$$

Nas quais:

GHR : indicador de graus-hora para resfriamento;

GHA : indicador de graus-hora para aquecimento;

To : temperatura operativa.

Os indicadores GHR e GHA representam os graus-hora de desconforto térmico por calor e por frio, respectivamente. Eles são calculados somando as diferenças entre as temperaturas operativas horárias e os limites de conforto para calor e frio especificados.

Foi realizada uma simulação anual em nível horário para coletar dados de temperatura do ambiente e da água. A partir dessas simulações, foram obtidos os resultados para dias típicos de inverno e verão, especificamente o dia 07 de julho e o dia 20 de fevereiro. As datas selecionadas refletem as temperaturas externas típicas de inverno e verão com um nível de probabilidade de 10% (FLORES, 2014).

3.3.1 Parâmetros de simulação: Subsistema de captação solar (SCS)

A modelagem dos brises em forma de placa solar foi mediante a ferramenta *Shading* que permitiu posicioná-los, definir dimensões e inclinações.

Os coletores do tipo placa plana foram configurados nos objetos *SolarCollector:FlatPlate:Water* e *SolarCollectorPerformance:FlatPlate*. No *SolarCollectorPerformance:FlatPlate* foi inserida a área do coletor, vazão de 35l/h, além das características térmicas e ópticas do coletor (tabela 4).

Tabela 4 - Especificações do coletor solar SCS

INMETRO		Coeficientes do coletor - ENERGYPLUS				
Fator de eficiência óptica [$F_R(\tau\alpha)$]	Coeficiente global de perdas ($F_R U_L$)	Coef. 1 equação de eficiência	Coef. 2 equação de eficiência	Coef. 3 equação de eficiência	Coef. 2 modificador do ângulo de incidência	Coef. 3 modificador do ângulo de incidência
0,77	4,27	0,774	-4,2	-0,006	-0,0052	-0,1585

Fonte: INMETRO (2020).

Os dados da bomba foram inseridos no objeto *Pump:VariableSpeed*, cujo funcionamento acontece quando há ganho útil de calor, para isso foi considerado o objeto *AvailabilityManager:DifferentialThermostat*, o qual permite que o subsistema funcione somente quando há aquecimento no coletor, ou seja, trata-se de um sensor locado no coletor e no boiler que controla o acionamento da bomba do SCS.

No objeto *WaterHeater:Mixed* foi configurado o reservatório térmico, sendo determinado um boiler de 500l locado sobre a cobertura.

3.3.2 Parâmetros de simulação: Subsistemas de climatização (SCM e SCG)

Incluiu-se na simulação os algoritmos *ConductionTransferFunction* e *ConductionFiniteDifference* para modelagem de transferência de calor em superfícies.

A superfície térmica foi configurada no objeto *Construction:InternalSource* presente no grupo *Surface Construction Elements*, compreendeu as especificações dos materiais expostos na tabela 2.

No objeto *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:ConstantFlow* o módulo térmico é relacionado à zona térmica e a superfície da zona em que o subsistema está localizado. O fluxo é constante e a temperatura da água é variável. Observa-se que esse objeto também possui campos que permitiram configurar a bomba de calor.

Inseriram-se na simulação os algoritmos *SurfaceConvectionAlgorithm:Inside* e *SurfaceConvectionAlgorithm:Outside*, que estão ligados à transferência de calor por convecção em superfície interna e externa, respectivamente, sendo adotado os modos padrões do programa. Como também, o objeto *HeatBalanceAlgorithm* com o *ConductionTransferFunction*, sendo responsável pela transmissão de calor por condução e considera apenas o calor sensível (GINJEIRA, 2010).

O objeto *GroundHeatExchanger:HorizontalTrench* foi selecionado como a fonte para a água arrefecida, esse objeto compreende o SCG que é composto por tubulações horizontais e a origem da água quente provém do boiler.

As temperaturas médias mensais do solo na profundidade de 4,5m foram incluídas no objeto *Site:GroundTemperature:Deep* que permite especificar as temperaturas de solos profundos, sendo adotados os valores da tabela 5.

Tabela 5 - Temperatura média mensal do solo

Temperaturas do solo (°C)											
Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
20,82	21,87	22,38	22,40	22,14	21,40	20,54	19,83	18,82	18,81	19,18	19,89

Fonte: Longo (2014).

As propriedades termofísicas dos tubos enterrados e do solo, expostas na tabela 6, foram inseridas no *GroundHeatExchanger:HorizontalTrench*, observa-se que as informações do solo também foram aplicadas no objeto *Site:GroundTemperature:Undisturbed:KusudaAchenbach*.

Tabela 6 - Propriedades termofísicas do cobre e solo

Propriedade termofísica	Cobre	Solo
Densidade	8900 kg/m ³	1700 kg/m ³
Condutividade térmica	380 W/m.K	1,7 W/m.K
Calor específico	0,38 kJ/kg.K	732,69 kJ/kg.K

Fonte: Mitchell (1993) e NBR 15220 (ABNT, 2005).

Com o programa *CalcSoilSurfTemp* do *Energyplus* foi possível obter a temperatura média do solo junto à superfície, a amplitude de variação da temperatura da superfície do solo e a constante de fase da superfície do solo. Para a obtenção das referidas variáveis, considerou-se a condição pesado e úmido, pois trata-se de solo argiloso e com capacidade de retenção de umidade (REINERT et al., 2007), além da situação de um solo descoberto e úmido (CAMARGO, 2017).

3.3.3 Parâmetros de simulação: Caso base

Para a modelagem do caso base foi utilizado o *SketchUp 17 Make* mediante o *plugin* *Euclid 0.9.3*, e a temperatura da interface do piso da edificação e o solo foi determinada por meio do pré-processador *Slab*, sendo este um programa auxiliar do *EnergyPlus*.

O caso base foi considerado sem usuário e sem potência instalada em equipamentos e iluminação para que não houvesse interferência nos resultados.

Os materiais e suas propriedades termofísicas (tabela 3), foram considerados na classe de objetos denominada *Surface Construction Elements*, no grupo de objetos denominado *Material*.

4 RESULTADOS

4.1 INFLUÊNCIA DA ENVOLTÓRIA NA OPERAÇÃO DO SCM

O desempenho térmico da envoltória atua nas condições internas do edifício, uma vez que sua relação com o ambiente externo impacta diretamente nos ganhos e perdas de calor. Essa observação revela que a envoltória tem o potencial de influenciar o processo de condicionamento térmico proporcionado por um sistema de climatização.

Deste modo, a tabela 7 apresenta o resultado de GHA do caso base nas diferentes orientações solares com e sem a presença do SCM.

Tabela 7 – Graus-hora de aquecimento do caso base nas diferentes orientações solares

GHA – Caso base com e sem SCM			
Orientação solar	Caso base sem o SCM	Caso base com o SCM	Percentual de redução de desconforto
Norte	7161	6529	9%
Leste	7836	7904	+1%
Oeste	7918	7805	1%
Nordeste	7396	7511	+2%
Noroeste	7505	7374	2%

Fonte: Autora (2021).

Observa-se pela tabela 7 que o SCM não foi capaz de reduzir significativamente o desconforto térmico anual por frio. No caso base a Leste e Nordeste há um aumento de 1% a 2% no desconforto, fator decorrente do sombreamento gerado pelo SCS na área envidraçada, interferindo no ganho térmico do ambiente por incidência solar, o que justifica a baixa representatividade do subsistema quanto à redução do desconforto térmico.

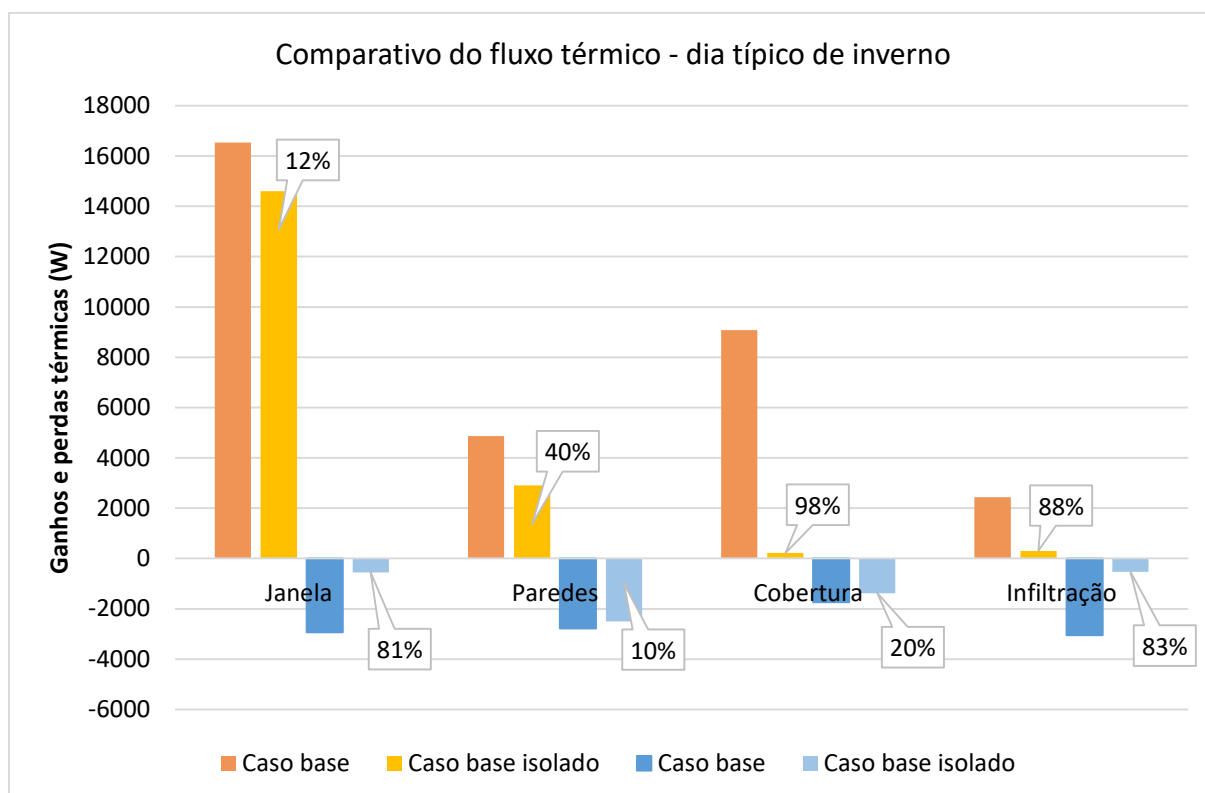
A influência dos brises-placas na redução do ganho térmico do caso base ocasionou mais estudos de brises com ângulos de 0° a 60° nas diferentes orientações solares, além da aplicação dos brises-placas com face contrária à trajetória solar no período de inverno; não houve, porém, mudanças expressivas nos resultados.

Os resultados obtidos indicaram que o SCM não atendeu à necessidade de fornecer aquecimento adequado para garantir a redução do desconforto por frio no ambiente. Este caso, por sua vez, considera o sistema aplicado em um ambiente composto de materiais com baixa capacidade de isolamento térmico.

Baseado nisso, investigou-se o fluxo térmico total dos elementos de vedação do caso base com fechamentos menos isolados termicamente e do caso base com materiais isolantes (figura 6). O foco da análise ocorreu no dia típico de inverno e elegeu-se o caso base orientado a Norte como exemplo para a comparação.

Destaca-se que a avaliação abrangeu elementos como janelas, paredes, cobertura e infiltração, o piso não foi considerado na análise, pois está sujeito à influência do SCM.

Figura 6 – Comparativo do fluxo térmico total no dia típico de inverno



Fonte: Autora (2021).

Os resultados referentes ao fluxo térmico do caso base isolado, apresentados na figura 6, demonstram que houve uma redução de 12% no ganho térmico por meio da janela e uma diminuição de 81% nas perdas de calor. O ganho de calor pelas paredes diminuiu em 40%, resultando em perdas de apenas 10%. Além disso, o ganho térmico pela cobertura foi reduzido em 98%, com perdas térmicas diminuindo em 20%. Por fim, verifica-se uma redução de 88% no ganho térmico devido à infiltração, juntamente com uma redução de 83% nas perdas térmicas associadas a esse fenômeno.

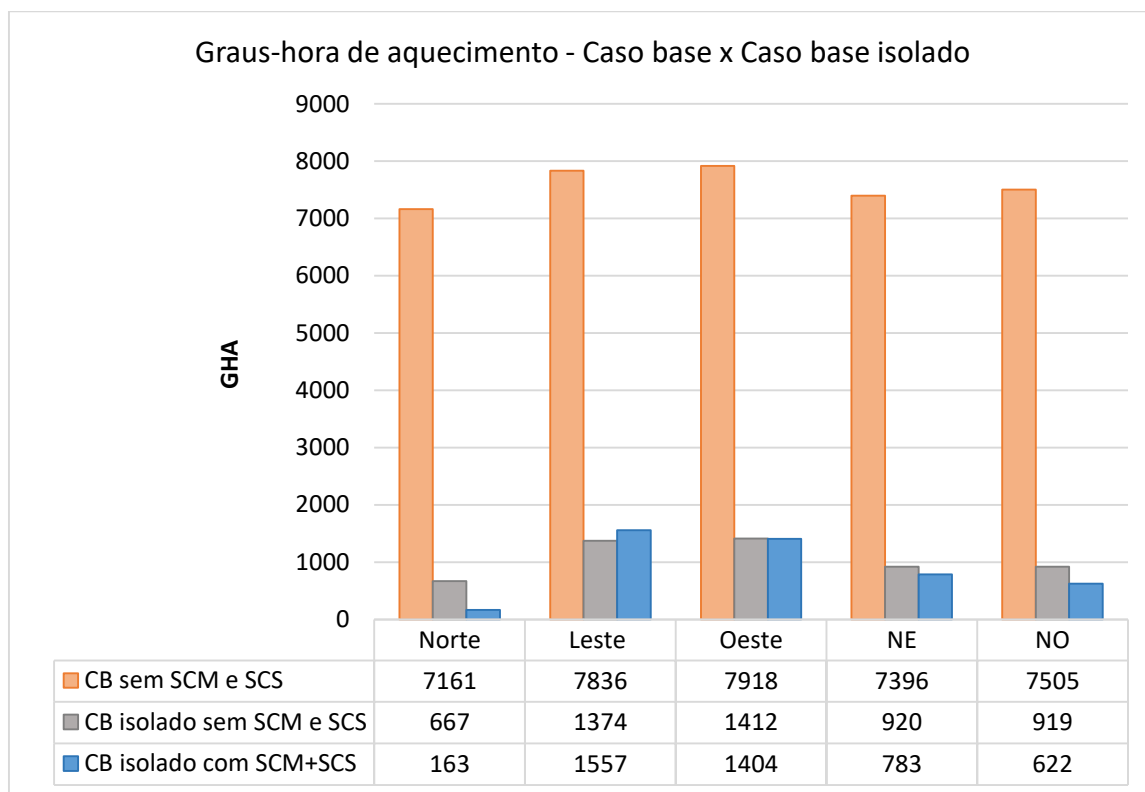
Com base nesses dados, fica evidente que uma envoltória mais eficaz em termos de isolamento térmico contribui para a significativa redução das perdas de calor por meio dos elementos de vedação, resultando em uma diminuição de 47% nas perdas de calor no ambiente.

É importante salientar que, entre os elementos de vedação, as janelas se destacam, pois, no que diz respeito ao ganho térmico, a mudança no tipo de vidro não apresentou um impacto significativo, uma vez que a maior parte desse ganho é proveniente da radiação solar. A

diferença observada é principalmente devido à baixa transferência de calor por condução através do vidro duplo. Quanto à infiltração, a escolha de uma janela com boa vedação tem um impacto positivo no controle das perdas de calor.

A figura 7 apresenta o desconforto térmico anual por frio (GHA), considerando o caso base (CB) sem fechamentos isolados e o caso base isolado, ambos sem e com a presença do SCM.

Figura 7 – Comparativo de graus-hora de aquecimento entre os casos base



Fonte: Autora (2021).

Na figura 7, observa-se que a alteração na composição dos elementos de vedação no caso base resultou em uma considerável redução do desconforto térmico causado pelo frio. Alcançando 91% no modelo voltado para o Norte, 82% nas direções Leste e Oeste, e 88% a Nordeste e Noroeste. Essa otimização foi decorrente dos materiais de alta capacidade de isolamento térmico no ambiente, com destaque para as esquadrias herméticas com vidro duplo e o EPS nas paredes e cobertura.

A introdução do SCM no caso base isolado resultou em uma redução de 76% no desconforto térmico por frio no modelo posicionado para Norte, 15% a Nordeste e 32% a Noroeste. Esses resultados ressaltam a influência direta dos elementos de vedação no desempenho do sistema híbrido, enfatizando a importância da utilização de materiais qualidade térmica na edificação, uma vez que isso mitiga a necessidade de climatização artificial e potencializa a atuação do equipamento de climatização.

No entanto, no caso base isolado com orientações Leste e Oeste, a redução do ganho térmico pelas janelas, devido ao sombreamento proporcionado pelos brises-placas, e as condições oferecidas pelo SCM não foram suficientes para influenciar no desconforto. Portanto, para otimizar o desempenho do sistema, especialmente nessas orientações solares, é apropriado considerar a implementação do SCS em outras aberturas. Além disso, pode-se adicionar brises-

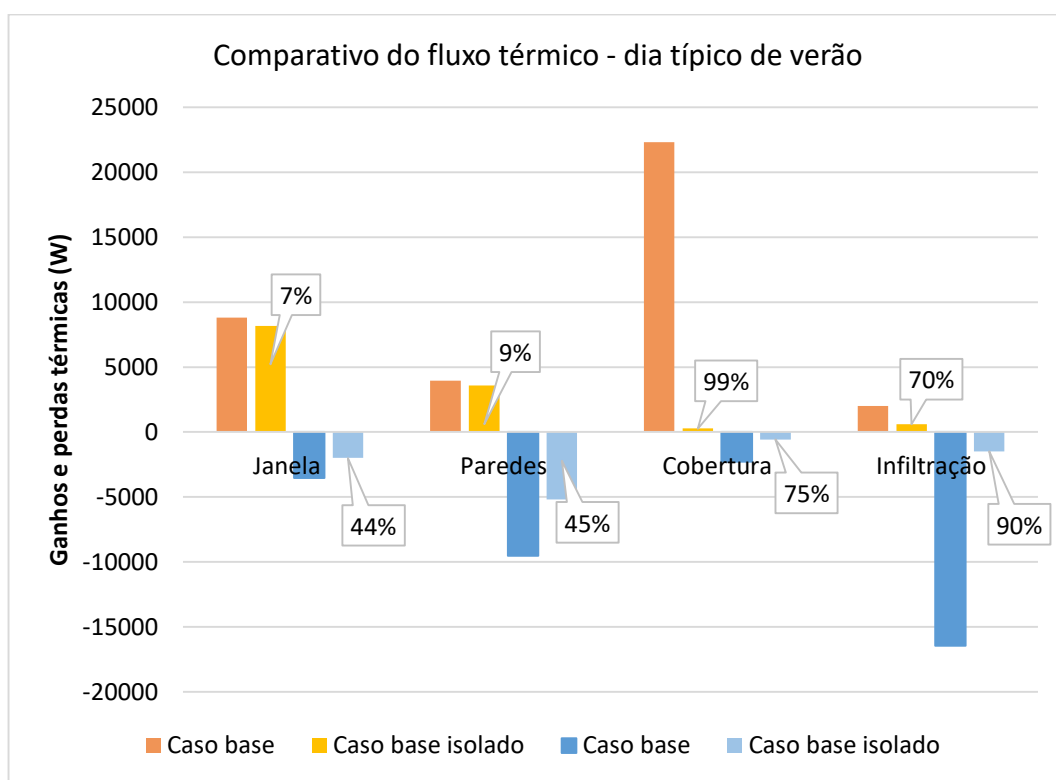
placas nas fachadas opacas em outras orientações solares para contribuir com o aquecimento de água ou incorporar dispositivos auxiliares para aquecer o fluido.

4.2 INFLUÊNCIA DA ENVOLTÓRIA NA OPERAÇÃO DO SCM E SCG

Dada a relevância da composição dos elementos de vedação do edifício, tanto em termos de conforto térmico quanto de funcionamento dos subsistemas, como discutido anteriormente durante a análise do SCM no período de frio, também foi realizada uma avaliação do fluxo de calor no caso base voltado para o Norte durante o dia típico de verão.

Dessa forma, analisou-se o fluxo térmico total no caso base e no caso base isolado orientado à Norte, com destaque para o dia típico de verão (figura 8).

Figura 8 – Comparativo do fluxo térmico total no dia típico de verão



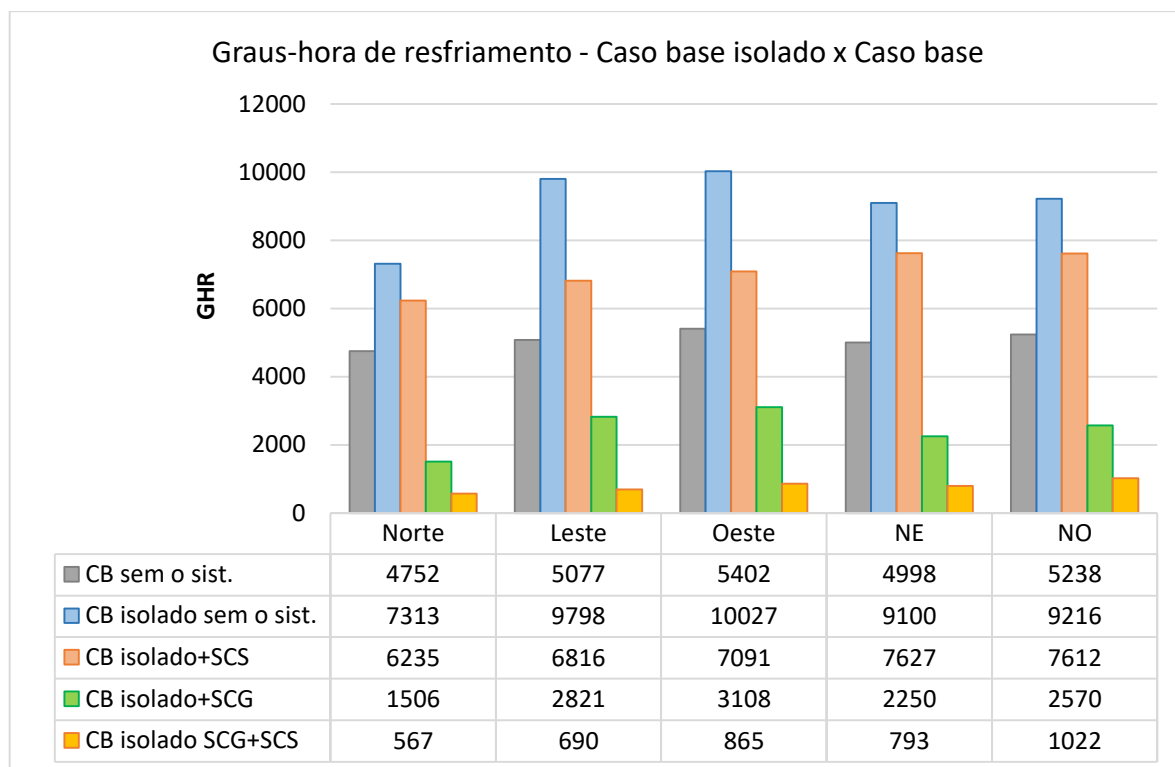
Fonte: Autora (2021).

Os dados referentes ao fluxo térmico no caso base isolado, conforme evidenciados na figura 8, indicam que houve uma redução de 7% no ganho térmico por meio da janela e uma diminuição de 44% nas perdas de calor. O ganho de calor pelas paredes diminuiu em 9%, resultando em perdas reduzidas em 45%. Além disso, o ganho térmico pela cobertura foi reduzido em 99%, enquanto as perdas térmicas por esse elemento caíram em 75%. Por fim, observa-se uma redução de 70% no ganho térmico devido à infiltração de ar, juntamente com uma redução de 90% nas perdas de calor por esse meio.

Diante desses resultados, observa-se que uma envoltória com maior isolamento térmico impacta efetivamente os ganhos e perdas de calor, devido à presença do material isolante nos elementos de vedação. Esse isolamento é capaz de atenuar a transferência de calor, o que resultou em uma redução de 34% nos ganhos de calor e 29% nas perdas térmicas no caso base.

Com relação ao indicador de graus-hora para resfriamento, a figura 9 ilustra o GHR dos casos base (CB), estabelecendo um comparativo entre o caso base isolado e o caso base sem fechamentos isolados, ambos ambientes com e sem SCG e SCS.

Figura 9 – Comparativo de graus-hora de resfriamento entre os casos base



Fonte: Autora (2021).

De acordo com a figura 9, a análise revela que, em todas as orientações solares, o caso base isolado, sem a presença do SCS e do SCG, resultou em um aumento significativo no desconforto térmico por calor.

Em períodos quentes, os materiais isolantes apresentam condições térmicas desfavoráveis devido à dificuldade de dissipar o calor acumulado ao longo do dia, especialmente causado pela radiação solar direta nas superfícies envidraçadas. Isso resulta em um aumento considerável no desconforto térmico durante esses períodos, com um acréscimo de 35% na orientação Norte, 48% a Leste, 46% a Oeste, 45% a Nordeste e 43% a Noroeste.

A introdução do SCS no caso base isolado permitiu uma mitigação significativa do desconforto térmico por calor, com reduções de 15% no modelo a Norte, 30% a Leste, 29% a Oeste, 16% a Nordeste e 17% a Noroeste. Esse efeito é resultado do sombreamento proporcionado pelos brises-placas nas superfícies envidraçadas, reduzindo os ganhos térmicos no ambiente.

No caso base isolado, dependendo apenas do SCM apoiado pelo SCG para o condicionamento térmico, alcançou-se uma considerável redução no desconforto térmico por calor, sendo uma diminuição de 79% no modelo orientado a Norte, 71% a Leste, 69% a Oeste, 75% a Nordeste e 72% a Noroeste.

Nesse contexto, fica evidente que o SCG foi mais eficaz do que o SCS na redução do desconforto térmico. Isso foi comprovado por meio dos estudos de fluxo térmico, destacando que envoltórias com baixa qualidade térmica facilitam a troca de calor, prejudicando a eficácia do condicionamento térmico.

A implementação conjunta do SCS e do SCG no caso base isolado se revelou uma solução altamente satisfatória para a redução do desconforto térmico por calor no ambiente, obtendo-se uma diminuição de 92% na orientação Norte, 93% a Leste, 91% a Oeste e Nordeste, e 89% a Noroeste.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto dos fechamentos na climatização realizada por um sistema híbrido solar e geotérmico, uma vez que as propriedades termofísicas da envoltória exercem uma influência significativa nas condições internas do edifício. A interação da envoltória com o ambiente externo resulta em uma "resposta" que é conhecida como desempenho térmico, e essa resposta, por sua vez, afeta diretamente o conforto das pessoas que ocupam o espaço.

Deste modo, uma análise detalhada dos fluxos térmicos dos fechamentos do caso base, revelou perdas significativas de calor por meio dos fechamentos, devido à insuficiência do isolamento térmico dos materiais utilizados nesse modelo. Isso ocasionou um desempenho insatisfatório dos subsistemas que integram o sistema híbrido para a mitigação do desconforto térmico.

Embora o caso base isolado inicialmente tenha apresentado mais desconforto térmico por calor em comparação ao caso base, verificou-se que a atuação do SCM e do SCG foi potencializada nesse tipo de envoltória devido à redução das trocas térmicas. Assim, os subsistemas foram eficazes na melhoria das condições internas, gerando resultados significativos em termos de resfriamento do ambiente, especialmente quando comparados aos dados obtidos no caso base.

Por fim, observa-se que quando os fechamentos não conseguem controlar efetivamente as trocas térmicas na edificação, o calor gerado ou removido pelo sistema de climatização tem um impacto limitado na redução do desconforto. Nessas circunstâncias, a aplicação de um sistema híbrido de climatização não se mostra adequada, ressaltando que a edificação precisa atender a requisitos mais rigorosos de qualidade construtiva no que diz respeito às questões térmicas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações: parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005.
- ASHRAE. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE 55:** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2012.
- CALISE ET AL. 2020. **Energy and economic analysis of a small hybrid solar-geothermal trigeneration system: A dynamic approach.** Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422031402X>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- CAMARGO, M. **Análise do Desempenho de Dutos Enterrados para Arrefecimento de uma Habitação na Zona Bioclimática 2.** 2017. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA.** 2008. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

FLORES, M. G. **Geração da base Climática de Santa Maria-RS para Análise de Desempenho Térmico e Eficiência Energética de Edificações**. 2014. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

GINJEIRA, A. S. G. **Simulação e análise custo-benefício de sistemas energéticos para uma habitação unifamiliar em clima Português, com foco em sistemas geotérmicos**. 2010. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente)–Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Requisitos Técnicos da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Residenciais – RTQ-R**. Brasil, 2012.

_____. **Coletores Solares Térmicos (Aplicação Banho)**. 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/Coletor-Solar-Banho-PBE-2018.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2019.

LI, L.; LIU X.; ZANGH, T. **Performance analysis and instant/delayed characteristics of a solar heating system used in cold regions**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220334008#sec3.1>. Acesso em: 20 mar. 2021.

LIANG, H. Optimization of floor radiant air conditioning heating system in building heating design. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, [s. l.], jun. 2020.

LIDDAMENT, M. W. **Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide**. Bracknell: Berkshire, 1986. Disponível em: <https://www.aivc.org/sites/default/files/members-area/medias/pdf/Guides/GU02%20AIR%20INFILTRATION%20CALCULATION%20TECHNIQUES.PDF>. Acesso em: 20 abr. 2020.

LONGO, A. J. **Instrumentação eletrônica para levantamento do perfil geométrico superficial visando a troca sustentável de calor**. 2014. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons, 2 ed. 1993.

OBALANLEGE, M. A. et al. **Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity**. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119315526>. Acesso em: 20 jun. 2020.

REINERT, D. J. et al. **Principais solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul: GUIA DE EXCURSÃO**. 2. ed. 2007.

SOARES, R. M. D. **Aplicação do Regulamento para Etiquetagem do Nível de Eficiência Energética em Edificação Unifamiliar Padrão Normal na Zona Bioclimática 2 Brasileira**. 2014. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

_____. **Sistema Híbrido Solar e Geotérmico para Aquecimento de Água e Condicionamento Térmico**. 2021. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

SORGATO, Márcio José. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

WEBER, F. S. et al. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis/SC: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/714>. Acesso em: 4 jul. 2020.

ZAREI A. et al. **A Novel, eco-friendly combined solar cooling and heating system, powered by hybrid Photovoltaic thermal (PVT) collector for domestic application**. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420307421>. Acesso em: 10 jan. 2021.