



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FACULDADE IMED
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**INSERÇÃO DE PISOS RADIANTES HIDRÁULICOS NO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL**

PIETRA BARASUOL HAMMES

PASSO FUNDO

2021

PIETRA BARASUOL HAMMES

**INSERÇÃO DE PISOS RADIANTES HIDRÁULICOS NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, em sua área de concentração em Tecnologia do Ambiente Construído, Linha de Pesquisa Gestão da Construção e Desempenho das Edificações, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade IMED.

Orientador: Prof. Dr. Richard Thomas Lermen

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Cóstola

PASSO FUNDO

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Hammes, Pietra Barasuol

Inserção de pisos radiantes hidráulicos no estado do Rio Grande do Sul. / Pietra Barasuol Hammes. __ Passo Fundo, 2021.

147f.

Orientador: Prof. Dr. Richard Thomas Lermen.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Cóstola.

Dissertação (Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil – Faculdade IMED, 2021.

1. Piso Radiante Hidráulico. 2. Instalações. 3. Conforto Térmico. 4. Transferência de Calor. I. Título.

PIETRA BARASUOL HAMMES

**INSERÇÃO DE PISOS RADIANTES HIDRÁULICOS NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, em sua área de concentração em Tecnologia do Ambiente Construído, Linha de Pesquisa Gestão da Construção e Desempenho das Edificações, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade IMED.

Passo Fundo, 21 de maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Richard Thomas Ierme - (PPGEC - IMED) - Orientador



Prof. Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante - (PPGEC - IMED)



Prof. Dra. Grace Lidério Cardoso - (PPGARC - IMED)

PASSO FUNDO

2021

Dedico esse trabalho aos meus pais, **Pedro e Ines**, que sempre me auxiliaram e estiveram ao meu lado.

À minha irmã, **Monique**, que me apoiou e incentivou durante toda a trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pela vida e por tantas bênçãos alcançadas.

Aos meus pais, que não mediram esforços para que esse sonho se tornasse realidade. Agradeço pelo apoio de vocês, pelas palavras de conforto quando meu coração se sentia angustiado, por vibrarem comigo nas minhas conquistas, por me incentivarem a nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu namorado, Felipe, que me acompanhou durante essa trajetória, me motivando todos os dias e reforçando sempre a minha capacidade. Obrigada pelo teu companheirismo, pelo teu incentivo, pela tua paciência e compreensão comigo, pelos domingos e feriados em casa.

Agradeço ao meu orientador, Richard Thomas Lermen, pela sua dedicação em revisar o meu trabalho, contribuir com seus ensinamentos e me auxiliar para que esse trabalho se desenvolvesse conforme o esperado. Agradeço pela tua paciência e compreensão durante essa trajetória.

Agradeço ao meu coorientador, Daniel Cóstola, pela sua ajuda em todos os momentos, por ter acolhido a minha ideia, por ter sido paciente comigo em tantos momentos, por ter me ensinado tanto e acreditado no meu potencial.

Agradeço a banca examinadora, Prof. Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante e Prof. Dra. Grace Tibério Cardoso, pelas brilhantes considerações que guiaram a confecção final deste trabalho. Agradeço também aos professores do Mestrado da IMED por compartilharem o seu conhecimento e por estarem sempre à disposição dos alunos.

Às amigas que conheci durante o mestrado, que estiveram em cada momento, que compartilharam comigo os seus anseios e alegrias. Ao nosso grupo, que se apoiou durante toda essa trajetória e transmitiu tanta positividade e força para cada uma em seus melhores e piores momentos. Jéssica, Lara, Louise, Marinês e Rafaela, agradeço a Deus pelo mestrado ter nos apresentado e nos unidos.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

A utilização do sistema de piso radiante hidráulico (PRH) vem crescendo em todo o mundo. Entretanto, no Brasil, além de haver uma escassez de estudos relacionados ao tema, esse sistema ainda é pouco utilizado comparado com países desenvolvidos. Ademais, o Brasil é um país que não possui uma norma que regulamenta o PRH, o que acarreta em uma incerteza de como esse sistema está sendo introduzido no país. Por isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar como o PRH está sendo introduzido no estado do Rio Grande do Sul (RS) e determinar o desempenho térmico de um ambiente que utiliza esse sistema. Entrevistas semiestruturadas com sete empresas que trabalham com o PRH no RS foram realizadas para entender a implementação desse sistema no estado. O comportamento térmico dos PRH foi determinado por simulação computacional usando o *software* Esp-r, identificando, principalmente, a influência do isolamento térmico na parede em uma sala de estar elaborada com o sistema de PRH em um dia de verão e inverno. Foram simulados oito modelos, dois sem isolamento térmico na parede e seis modelos com isolamento térmico (EPS). A espessura do EPS variou entre 25 mm, 50 mm e 75 mm. Os resultados das entrevistas mostraram uma semelhança na maioria dos materiais utilizados, na forma de execução e controle. Contudo, detectou-se diferenças quanto a alguns parâmetros que, de acordo com a literatura, influenciam diretamente no desempenho térmico, tais como: diferença no espaçamento entre os tubos, no material e espessura da camada de isolamento e na espessura da camada de argamassa. Quanto às simulações computacionais, os resultados apresentaram uma economia de energia anual de até 92,76% no modo de aquecimento de piso com o uso do isolamento térmico na parede. Entretanto, em um dia típico de verão, no modo de resfriamento, essa economia de energia foi inferior, chegando a 18,44%. Quanto às temperaturas, o uso do isolamento térmico na parede resultou em um ambiente com maiores temperaturas na superfície do piso, temperaturas do ar no interior da sala, temperaturas radiantes e também um PMV mais elevado, o que conseqüentemente elevou o desconforto térmico em um dia típico de verão, pois o ambiente sofreu um superaquecimento. Contudo, em um dia típico de inverno os resultados foram satisfatórios, com um PMV próximo ao neutro. Logo, esse trabalho concluiu que o PRH é uma tecnologia promissora no estado do RS. No entanto, seria necessário a implementação de uma norma brasileira relacionada ao sistema para que as empresas dimensionem, projetem e executem de acordo com as recomendações estabelecidas na norma. Além disso, o trabalho mostrou que o isolamento térmico nas paredes é imprescindível para os usuários que desejam aquecer o ambiente com o piso radiante, uma vez que, a presença do isolamento térmico reduz a perda de calor para o exterior. Enquanto para o resfriamento do ambiente é necessário considerar a ventilação natural, as estratégias de sombreamento, tais como o uso de persianas ou elementos que reduzam a incidência solar, e entre outras estratégias para atingir o conforto térmico.

Palavras-chave: Piso Radiante Hidráulico. Instalações. Conforto térmico. Transferência de Calor.

ABSTRACT

The use of hydronic radiant floor heating systems (HFHS) has been growing worldwide. However, in Brazil, beyond having a scarcity of studies on the subject, the system is still underused if compared with developed countries. Additionally, there is no standard regulation on the HFHS in Brazil, which results in an uncertainty of how the system is being introduced in the country. Therefore, the objective of this work was to evaluate how the HFHS is being introduced in the state of Rio Grande Do Sul (RS) and to determine the thermal performance of an area where the system was used. Semi-structured interviews were applied to seven companies that work with the HFHS in RS to understand the implementation of the system in the state. The thermal behavior of the use of the HFHS was determined by computer simulation using *Esp-r software*, identifying, mostly, the influence of the thermal insulation on the wall of a room built with a HFHS on a summer and winter day. Eight models were simulated, two without thermal insulation on the wall and six models with thermal insulation (EPS). EPS thickness ranged between 25 mm, 50 mm and 75 mm. The results of the interviews demonstrated a similarity in most of the used materials, in the way of execution and control. However, differences were detected in some parameters that, according to the literature, directly influence on thermal performance, such as: difference in the spacing between the tubes, in the material and thickness of the insulation layer and in the thickness of the mortar layer. As for the computer simulations, the results indicated an annual energy saving of up to 92,76% in the floor heating mode with the use of thermal insulation on the wall. Meanwhile, on a typical summer day, on the cooling mode, the energy saving was lower, reaching 18,44%. With regard to the temperatures, the use of thermal insulation on the wall resulted in an area with higher temperatures on the floor surface, air temperatures inside the room, radiant temperatures and also a higher PMV, which consequently increased thermal discomfort on a typical summer day, because the area was overheated. Nevertheless, on a typical winter day, the results were satisfactory, with PMV close to neutral. Therefore, this work concluded that the hydronic radiant floor heating systems are a promising technology in the state of RS due to the advantages over conventional systems, such as less local thermal discomfort and non-aesthetic interference. However, it would be necessary to implement a Brazilian regulation related to the system so companies can scale, design and execute the projects according to the recommendations determined on the regulation. Moreover, the work indicates that thermal insulation on the walls is essential for users who want to heat areas with radiant flooring, since the presence of thermal insulation reduces heat loss to the outside. While for the cooling of the area it is necessary to consider natural ventilation, shading strategies, such as the use of blinds or elements that reduce the solar incidence, among other strategies to reach thermal comfort.

Keywords: Hydronic Radiant Floor. Installation. Thermal Comfort. Heat Transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferença entre a distribuição de temperatura dos dois sistemas	20
Figura 2 - Corte do sistema de piso radiante hidráulico	21
Figura 3 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios	28
Figura 4 - Ilustração dos tipos de painéis radiantes	31
Figura 5 - Mecanismos de transferência de calor.....	32
Figura 6 - Desconforto térmico local causado por pisos quentes ou frios	35
Figura 7 - Layout dos tubos em forma de espiral e serpentina.....	36
Figura 8 - Disposição dos trocadores de calor (horizontal e vertical).....	39
Figura 9 - Locais de medição para avaliação da sensação térmica e conforto	46
Figura 10 - Desenvolvimento do método através da sala de testes	47
Figura 11 - Layout da tubulação do apartamento simulado	50
Figura 12 - Planta baixa do modelo base simulado.....	59
Figura 13 - Primeiro pavimento da residência	60
Figura 14 - Corte do piso radiante utilizado na residência	63
Figura 15 - Camadas que compõe o tubo utilizado no sistema.....	76
Figura 16 - “Isopor” de alta densidade com nódulos	78
Figura 17 - Instalação de uma obra realizada pela empresa B	81
Figura 18 - Instalação realizada pela empresa E	82
Figura 19 - Termostatos utilizados para controle da temperatura	85
Figura 20 - Detalhamento da caixa de distribuição utilizada pela empresa B	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura do ar na cidade de Passo Fundo	58
Gráfico 2 - Temperatura média do ar de cada mês do ano.....	58
Gráfico 3 - Graus hora para o aquecimento e resfriamento durante um ano	66
Gráfico 4 - Tempo de aquecimento de acordo com cada empresa.....	87
Gráfico 5 - Utilização de normas pelas empresas.....	89
Gráfico 6 - Maiores elogios dos usuários	94
Gráfico 7 - Principais reclamações dos usuários.....	95
Gráfico 8 - Monitoramento de satisfação dos usuários	96
Gráfico 9 - Custo de implementação dos pisos radiantes hidráulicos e elétricos	98
Gráfico 10 - Temperaturas internas e externa dos modelos sem condicionamento térmico	103
Gráfico 11 - Temperatura do ar nos modelos com condicionamento térmico	104
Gráfico 12 - Radiação solar em um dia típico de verão.....	106
Gráfico 13 - Temperatura do ar nos modelos sem condicionamento térmico	107
Gráfico 14 - Energia solar em um dia típico de inverno (21 de junho).....	108
Gráfico 15 - Temperatura do ar nos modelos com condicionamento térmico	109
Gráfico 16 - Temperatura radiante dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão.....	110
Gráfico 17 - Fluxo de calor dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão.....	111
Gráfico 18 - Temperatura radiante dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de verão.....	112
Gráfico 19 - Fluxo de calor dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de verão.....	113
Gráfico 20 - Temperatura radiante dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno	114
Gráfico 21 - Fluxo de calor dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno	115
Gráfico 22 - Temperatura radiante dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de inverno	116
Gráfico 23 - Fluxo de calor dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de inverno	117

Gráfico 24 - Temperatura da superfície do piso nos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão	119
Gráfico 25 - Temperatura da superfície do piso nos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de verão	120
Gráfico 26 - Temperatura da superfície do piso nos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno.....	122
Gráfico 27 - Temperatura da superfície do piso nos modelos com condicionamento térmico	123
Gráfico 28 - PMV durante um dia típico de verão.....	124
Gráfico 29 - PMV durante um dia típico de inverno.....	126
Gráfico 30 - Consumo anual de energia para aquecimento	127
Gráfico 31 - Consumo anual de energia para resfriamento.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da temperatura dos sistemas aquecidos por água.....	38
Tabela 2 - Partes que compõe as normas EN 1264 e EN 15377.....	40
Tabela 3 - Código e descrição dos modelos simulados	62
Tabela 4 - Propriedade térmica dos materiais.....	64
Tabela 5 - Ganhos de calor na sala de estar.....	64
Tabela 6 - Escala de sete pontos da sensação térmica	69
Tabela 7 - Taxa metabólica para diferentes atividades	71
Tabela 8 - Índice de resistência térmica para vestimentas.....	71
Tabela 9 - Caracterização das empresas.....	73
Tabela 10 - Fonte de abastecimento das caldeiras.....	79
Tabela 11 - Local de importação dos materiais.....	92
Tabela 12 - Problemas comuns de ocorrer após a instalação do piso radiante	92
Tabela 13 - Periodicidade das manutenções	93
Tabela 14 - Pisos mais vendidos pelas empresas	97

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACIII - Argamassa Colante Tipo III

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

DOAS - *Dedicated Outdoor Air System*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EN - *Norme Européenne*

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPS - Poliestireno Expandido

EPW - *EnergyPlus Weather File*

HVAC - *Heating Ventilation and Air Conditioner*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISO - *International Organization for Standardization*

NBR - Norma Técnica Brasileira

PCM - *Phase Change Materials*

PEX – Polietileno Reticulado

PMV - Predicted Mean Vote (Voto Médio Estimado)

PP - Polipropileno

PRH - Piso Radiante Hidráulico

PVC - Policloreto de Vinila

TABS - Sistemas de Construção Termicamente Ativados

TRM - Temperatura Radiante Média

VAV - *Variable air volume*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	24
1.1.1 Objetivos Específicos	24
2 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 CONFORTO TÉRMICO.....	25
2.1.1 Conforto Térmico em Sistemas Radiantes	25
2.1.2 Normatizações de Conforto Térmico	26
2.1.3 Conforto Térmico Segundo o Modelo Estático e Adaptativo	26
2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	28
2.3 SISTEMA DE PISO RADIANTE	30
2.3.1 Panorama dos Sistemas de Piso Radiantes	30
2.3.2 Piso Radiante Hidráulico	33
2.3.3 Parâmetros de Projeto de Pisos Radiantes Hidráulicos	33
2.3.4 Formas de Aquecimento	36
2.3.5 Formas de Resfriamento	38
2.4 NORMAS E MANUAIS	39
2.4.1 Norma Europeia EN 1264	41
2.4.1.1 Limites de Temperatura.....	41
2.4.1.2 Instalação	41
2.4.1.3 Segurança do Sistema	43
2.5 SISTEMAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA.....	43
2.6 ESTUDOS COM USUÁRIOS EM EDIFÍCIOS REAIS E LABORATÓRIOS	45
2.7 ESTUDOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO	48
3 METODOLOGIA	53
3.1 ENTREVISTA COM EMPRESAS DE PISOS RADIANTES.....	53
3.1.1 Identificação das Empresas de Pisos Radiantes Hidráulicos	53
3.1.2 Elaboração do Roteiro da Entrevista	54
3.1.3 Realização das Entrevistas	54
3.1.4 Transcrição das Entrevistas Gravadas	54
3.1.5 Tratamento dos Dados e Análise dos Resultados	55
3.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO POR MEIO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	55
3.2.1 Software de Simulação	56

3.2.2	Dados Climáticos da Cidade de Passo Fundo	56
3.2.3	Arquivo Climático	57
3.2.4	Geometria da Sala	59
3.2.5	Modelos Simulados	60
3.2.6	Materiais dos modelos	62
3.2.7	Domínios Computacionais	64
3.2.7.1	Ganhos de Calor.....	64
3.2.7.2	Capacidade Máxima e Automação do Sistema.....	66
3.2.7.3	Sensores.....	67
3.2.7.4	Limitações das Simulações.....	67
3.2.8	Parâmetros Avaliados	67
3.2.8.1	Temperatura do ar.....	67
3.2.8.2	Temperatura da superfície do piso.....	68
3.2.8.3	Temperatura radiante.....	69
3.2.8.4	PMV.....	69
3.2.8.5	Gasto de energia.....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	ENTREVISTAS COM AS EMPRESAS	73
4.1.1	Caracterização das Empresas	73
4.1.2	Caracterização dos Entrevistados	74
4.1.3	Dados relacionados ao Projeto	75
4.1.4	Dados Relacionados ao Sistema de Aquecimento Central	79
4.1.5	Dados Relacionados ao Controle	84
4.1.6	Dados Relacionados às Normas	89
4.1.7	Dados Relacionados aos Materiais e Mão de Obra	91
4.1.8	Dados Relacionados ao Pós-venda	92
4.1.9	Dados Relacionados aos Produtos	96
4.1.9.1	Custo de Implementação dos Pisos.....	98
4.1.10	Análise Geral das Entrevistas	99
4.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	103
4.2.1	Temperatura do Ar dos Modelos em um Dia Típico de Verão	103
4.2.2	Temperatura do Ar dos Modelos em um Dia Típico de Inverno	107
4.2.3	Temperatura Radiante dos Modelos em um Dia Típico de Verão ...	110
4.2.4	Temperatura Radiante dos Modelos em um Dia Típico de Inverno	114

4.2.5	Temperatura da Superfície do Piso dos Modelos em um Dia Típico de Verão	119
4.2.6	Temperatura da Superfície do Piso dos Modelos em um Dia Típico de Inverno	122
4.2.7	PMV dos Modelos em um Dia Típico de Verão	124
4.2.8	PMV dos Modelos em um Dia Típico de Inverno	125
4.2.9	Análise do Gasto de Energia Anual	127
4.3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	130
5	CONCLUSÃO	131
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
	REFERÊNCIAS.....	134
	APÊNDICE A – ROTEIRO DAS ENTREVISTAS	144

1. INTRODUÇÃO

Em comparação com outros países, o Brasil possui um baixo consumo de energia para o condicionamento térmico das construções (ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2016). Esse baixo consumo de energia é consequência da grande utilização de energias renováveis no país, em especial, a energia hidráulica, o que acarreta um baixo impacto ambiental do condicionamento de edifícios. Isso ocorre porque a energia renovável tem uma menor emissão de carbono do que os combustíveis fósseis (EPE, 2019). No entanto, esse cenário está mudando com o aumento das recentes demandas de pico de energia e novas construções, visto que não há uma redução significativa no consumo de energia elétrica desde a crise energética de 2001. Este aumento fez necessária a expansão do uso de combustíveis fósseis na matriz energética brasileira, o que tende a aumentar nas próximas décadas (CBCS; MMA; PNUMA, 2014).

O crescimento econômico em uma região e a consequente melhora no padrão de vida da população faz com que as pessoas se tornem cada vez mais exigentes em relação ao conforto térmico (OUBENMOH *et al.*, 2018). Essa busca pelo conforto térmico tem sérias consequências para o desempenho energético dos edifícios, pois os projetos não são pensados de forma passiva, o que representa uma grande fonte de preocupação para os governos (EPE, 2018) que, junto a profissionais da área, buscam adotar diversas medidas para assegurar o conforto térmico e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo de energia (CALERO *et al.*, 2018). Tais medidas incluem a otimização da área envidraçada, da orientação do edifício, da ventilação natural, do nível de isolamento e inércia térmica dos elementos da envoltória e afins (ATZERI *et al.*, 2018).

Este aumento nas exigências de conforto térmico pelos usuários associado às modificações no ambiente construído tem sido observado no estado do Rio Grande do Sul, que possui as quatro estações do ano bem definidas, com temperaturas elevadas no verão e baixas no inverno (EMBRAPA, 2011). Essa variação na temperatura faz com que muitas pessoas recorram ao uso de ar condicionado para melhorarem o conforto térmico de suas residências no verão, e procurem equipamentos para aquecer suas residências no inverno (CHUA *et al.*, 2013).

Entretanto, o uso crescente de ar condicionado em residências e escritórios será um dos principais impulsionadores da demanda global de eletricidade nas próximas três décadas em todo o mundo, visto que, com o aumento na renda e nos

padrões de vida há uma tendência de que a demanda por ar condicionado aumente ainda mais nos países em desenvolvimento (IEA, 2018). De acordo com a EPE (2018), o consumo de energia desse sistema nas residências brasileiras mais que triplicou nos últimos 12 anos, contribuindo para o aumento da demanda energética e da poluição, incluindo emissões de gases do efeito estufa.

Apesar do Brasil ter implementado ações de eficiência energética, como as políticas de etiquetagem e os índices mínimos de eficiência energética para os equipamentos, ainda observa-se que existem barreiras a serem superadas para que o mecanismo de padrões de eficiência tenha resultados mais amplos no Brasil (EPE, 2018). Por este motivo, as atuais técnicas de condicionamento de ar precisam ser melhoradas, a fim de reduzir o consumo de energia (EPE, 2018), a geração de poeiras, que prejudicam a saúde (CHEUNG; JIM, 2019), e a geração de ruídos (SANTOS, 2019). Logo, é importante avaliar outras técnicas que também melhoram o desempenho térmico das edificações.

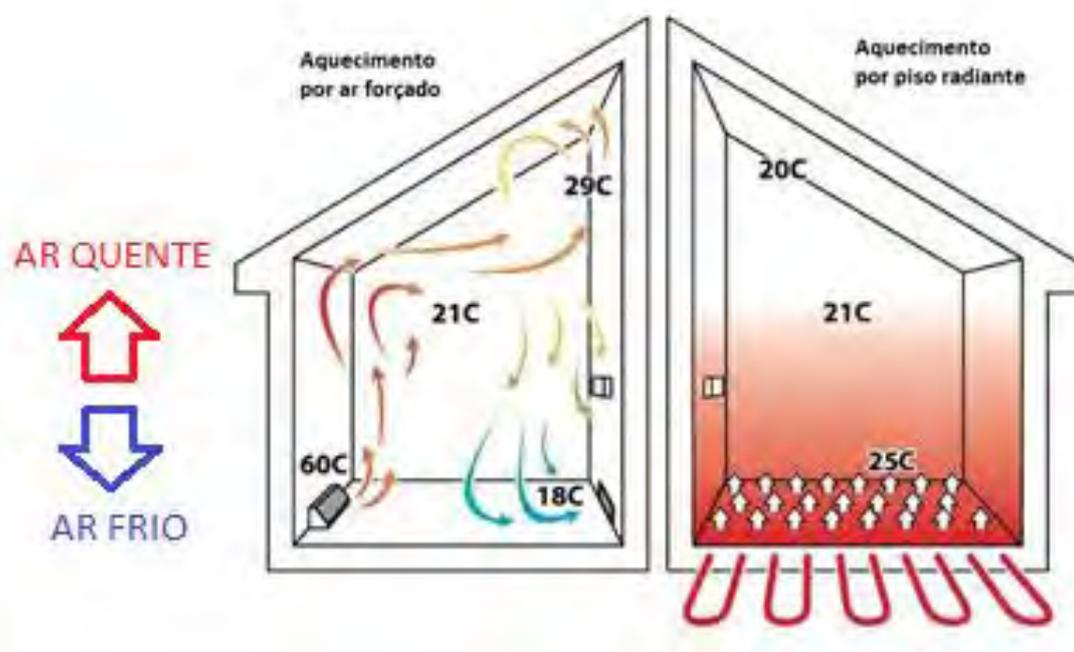
O desempenho térmico dos edifícios e a redução do consumo de energia podem ser melhorados através de diversas tecnologias inovadoras que estão sendo desenvolvidas (SOBCZYK; E, 2019). Uma dessas tecnologias é o sistema de aquecimento e resfriamento por piso radiante hidráulico. Esse sistema é uma das alternativas para reduzir o consumo de energia causado pelos sistemas de ar condicionado, já que estudos mostram uma redução de até 50% de energia em comparação com os sistemas de ar condicionado (THORNTON *et al.*, 2009; LEACH *et al.*, 2010; SALVALAI; PFAFFEROTT; SESANA, 2013). Essa economia de energia ocorre porque um sistema de aquecimento e resfriamento por piso radiante pode atingir o mesmo nível de conforto térmico em um ambiente com temperatura interna mais baixa no inverno e uma temperatura interna mais alta no verão. Logo, quando comparado com o sistema de ar condicionado convencional, essa diferença de temperatura pode contribuir para reduzir a demanda de energia do edifício e, assim, reduzir o consumo de energia (WU *et al.*, 2015).

A utilização dos pisos radiantes vem crescendo no mundo todo, como é o caso da Coreia do Sul, onde cerca de 90% das suas residências são aquecidas pelo sistema de piso radiante. Além da Coreia do Sul, cerca de 30% a 50% dos novos edifícios residenciais da Áustria, Dinamarca e Alemanha possuem esse sistema (OLESEN, 2002). Nas últimas duas décadas, eles se tornaram populares em diversos países e amplamente aplicados em edifícios residenciais. Esse crescimento se dá

pelo fato de que a grande amplitude térmica dentro da edificação acaba gerando desconforto localizado, já que os sistemas localizados não uniformizam a temperatura (WU *et al.*, 2015).

O sistema de piso radiante modula o ambiente térmico controlando diretamente as temperaturas da superfície e, conseqüentemente, a temperatura interna do ar (ASHRAE, 2016). A Figura 1 mostra a diferença de distribuição da temperatura do ar em um ambiente com aquecimento de ar forçado em um ambiente com piso radiante.

Figura 1 - Diferença entre a distribuição de temperatura dos dois sistemas



Fonte: Adaptado de Reis (2018).

Como pode-se observar, no aquecimento por ar forçado ocorre um processo de troca térmica convectiva em que a temperatura do ar é maior nas áreas mais altas devido ao movimento ascendente do ar, ou seja, o ar quente sobe e o ar frio desce. No entanto, em edificações térreas, o sistema de cobertura recebe maior insolação, o que acaba elevando a temperatura superficial. Com o uso do aquecimento de piso, a amplitude térmica interna vertical acaba sendo menor, com tendência à diminuição do desconforto localizado na região dos pés (frio), e na cabeça (mais quente). Por isso, o aquecimento por piso radiante distribui a temperatura de uma maneira mais uniforme em relação ao sistema de aquecimento por ar forçado.

Os pisos radiantes podem ser classificados de acordo com a sua fonte de calor. Atualmente existem três tipos: piso radiante hidráulico, elétrico e com circulação de ar. O piso radiante hidráulico funciona através da circulação de água quente ou fria por dentro da tubulação. O piso radiante com circulação de ar funciona através do fornecimento do ar aquecido ou resfriado por dentro das tubulações. Por fim, o piso radiante elétrico utiliza cabos elétricos para aquecer o ambiente (RASTELLO, 2013).

A Figura 2 ilustra, através de um corte, os componentes necessários para a instalação desse sistema, como a camada de isolamento, a malha de aço, os tubos por onde passará a água aquecida ou resfriada, a camada de argamassa para regularização do contrapiso, o revestimento final e o quadro de distribuição.

Figura 2 - Corte do sistema de piso radiante hidráulico



Fonte: Adaptado de Reis (2018).

As vantagens dos pisos radiantes já foram identificadas em diversos estudos (FIEDRICH, 1996; OLESEN, 2002; ZEILER; BOXEM, 2009; LIM; KIM, 2016). Os pisos radiantes possuem a vantagem de não elevarem a poeira porque não há tanta movimentação no ar como ocorre nos sistemas de ar condicionado; distribuírem o calor de maneira uniforme; melhorarem a qualidade do ar interno porque temperaturas mais elevadas nos tapetes e colchões reduzem a umidade e, conseqüentemente, as condições favoráveis de vida dos ácaros; não interferirem na estética do ambiente, pois ficam embutidos no piso e possuem um nível de ruído reduzido, quando comparado ao sistema tradicional de condicionamento de ar.

Porém, existem grandes desafios na implementação destes sistemas, que incluem o espaçamento adequado entre os tubos, o diâmetro do tubo, a espessura da camada de isolamento (CVETKOVIĆ; BOJIĆ, 2014), o layout da tubulação, a vazão

da água, a escolha da temperatura (OUBENMOH *et al.*, 2018), a demora no tempo de resposta do sistema e o controle da temperatura para que não ocorra a condensação da superfície resfriada e, nos casos de aquecimento, o superaquecimento dos pés (HASSAN; ABDELAZIZ, 2020).

A despeito destas dificuldades, tais pisos estão sendo utilizados no Rio Grande do Sul. Contudo, pesquisas realizadas no Google Acadêmico e Science Direct não identificaram trabalhos envolvendo estudos técnicos sobre o desempenho desses sistemas que estão sendo introduzidos no mercado no estado do Rio Grande do Sul.

Muitas empresas têm vendido esse sistema no estado do Rio Grande do Sul. Todavia, não se tem conhecimento de como é realizada a seleção da mão de obra, se esses profissionais são especializados ou se recebem algum tipo de treinamento. É importante ter conhecimento sobre essas informações, pois o desempenho do sistema está diretamente ligado ao entendimento e prática do instalador. Além da mão de obra, outro desafio é a escolha dos materiais, que devem ser de fabricantes qualificados, que garantam a sua qualidade, caso contrário, a durabilidade do sistema e dos materiais será inferior ao recomendado pelos fabricantes.

Os cuidados necessários, as intercorrências e patologias após a venda do sistema também são uma incógnita. Não se tem conhecimento de como as empresas agem em relação aos problemas que podem surgir, se há manutenção do sistema, qual a periodicidade dessas manutenções, se os clientes recebem assistência ou se há um monitoramento de satisfação do usuário. Essas questões são fundamentais para entender como funciona o pós-venda da empresa, visto que, algumas estão interessadas somente na venda do produto e acabam não se preocupando com a qualidade e satisfação dos usuários.

Dentro deste contexto, percebe-se que o sistema de piso radiante hidráulico é complexo e envolve alguns fatores que devem ser analisados para que o sistema tenha um bom desempenho. Contudo, a baixa utilização desse sistema no Brasil, comparado com outros países (RASTELLO, 2013), e a escassez de estudos relacionados ao sistema brasileiro deixa uma grande lacuna sobre como esse sistema está sendo introduzido no mercado do ponto de vista de legislação, normas, projeto, controle, instalação, mão de obra, materiais, patologias existentes e cuidados necessários.

As normas técnicas são essenciais para que o projetista e instalador saibam os parâmetros que devem ser levados em consideração na hora do projeto (LIM; KIM,

2016). Além do mais, elas servem como uma forma de verificação do conforto térmico do ambiente que está sendo aquecido ou resfriado, uma vez que, elas possuem uma faixa de temperatura a serem seguidas para assegurar a saúde e segurança do usuário (ASHRAE, 2016). No entanto, no Brasil não há normas referentes aos sistemas de pisos radiantes. A inexistência de uma norma específica para essa tecnologia causa uma certa desconfiança, pois não se tem conhecimento de como esse sistema está sendo introduzido no mercado, e se os projetistas e instaladores estão levando em consideração alguma norma internacional.

Os parâmetros de projeto também são um desafio para os projetistas, pois eles influenciarão diretamente no desempenho do sistema. Entre os parâmetros que devem ser analisados, destacam-se: diâmetro do tubo, profundidade de assentamento do tubo, temperatura da água, temperatura da superfície, espaçamento entre os tubos, escolha do material da camada de isolamento, espessura da camada de isolamento e entre outros. Um estudo realizado por Jeong e Jung (2015) mostrou que tubos com diâmetro muito pequeno, espaçamento muito grande e camada de isolamento com espessura inadequada diminuem o desempenho térmico do sistema. Além disso, o dimensionamento incorreto da fonte de aquecimento/resfriamento pode causar temperaturas não uniformes na superfície (ASHRAE, 2016).

A forma de instalação também deve ser levada em consideração porque um sistema instalado de forma incorreta pode fazer com que ocorra uma redução na sua eficiência. Algumas intercorrências podem surgir pela falta de cuidado na instalação, como a perfuração dos tubos durante a colocação do revestimento final. Essa perfuração acontece, principalmente, em revestimentos que precisam ser pregados (ASHRAE, 2016).

O controle do sistema de pisos radiantes envolve vários fatores e impacta diretamente no consumo de energia. Através desse controle, é possível atingir as temperaturas desejadas e programá-las de acordo com o horário. Porém, para que o sistema de piso radiante seja controlado de maneira eficiente é preciso levar em consideração a temperatura de entrada da água, a temperatura de saída esperada, a vazão, a programação para ligá-lo/desligá-lo e entre outras variáveis (BOCKELMANN; PLESSER; SOLDATY, 2013). Se a temperatura da água não for controlada pode ocorrer a condensação da superfície resfriada (ZARRELLA; DE CARLI; PERETTI, 2014). Com o controle é possível, por exemplo, ter um sistema que opera com alta temperatura por um curto intervalo de tempo, ou um sistema com baixa temperatura

e de forma contínua. Entretanto, um dos problemas relacionados ao controle do piso radiante é o tempo que ele demora para aquecer ou resfriar o ambiente (SONG *et al.*, 2008).

Uma das formas de verificar o desempenho de um sistema é através da simulação numérica. A simulação é uma ferramenta fundamental para identificar a quantidade de energia gasta nos sistemas de aquecimento e resfriamento, além de ser uma forma de encontrar soluções para otimizar os sistemas (MACHADO, 2017).

Muitos estudos avaliaram o desempenho do piso radiante através de simulações numéricas. Dentre eles, Zhang, Cai e Wang (2013) avaliaram os efeitos dos parâmetros de projeto, como a distância entre os tubos e a temperatura de abastecimento da água em relação a temperatura da superfície do piso e a temperatura do ar. Bojic, Cvetrovic e Bojic (2015) analisaram o desempenho do aquecimento radiante com três fontes de calor diferentes: caldeira a gás natural, bombas de calor de fonte subterrânea e bombas de calor de fonte subterrânea com painéis fotovoltaicos. WANG *et al.* (2019) avaliaram a velocidade do ar do sistema de piso radiante em comparação aos radiadores e ar condicionado.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi entender como o sistema de piso radiante hidráulico está sendo introduzido no Estado do Rio Grande do Sul em termos de parâmetros de projeto, forma de execução, normas utilizadas e forma de controle. Além disso, esse trabalho também avaliou numericamente a influência do isolamento térmico das paredes em um ambiente com aquecimento e resfriamento de piso.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar como as empresas de piso radiante hidráulico do RS estão projetando, executando e controlando a tecnologia desse tipo de piso;
- Avaliar as recomendações das empresas em relação aos cuidados com o piso radiante hidráulico;
- Avaliar a influência no desempenho térmico do sistema de piso radiante quando utilizado para aquecimento e resfriamento de um ambiente através de simulação numérica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONFORTO TÉRMICO

2.1.1 Conforto Térmico em Sistemas Radiantes

O conforto térmico é uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico. Esse conforto é influenciado por seis fatores principais: taxa metabólica, isolamento das roupas, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade. Contudo, as variáveis físicas e psicológicas mudam de pessoa para pessoa, dificultando a satisfação de todos em um ambiente. Por isso, as condições ambientais requeridas para o conforto não são as mesmas para todos (ASHRAE, 2017).

As diferentes exigências em relação ao conforto térmico podem ser atribuídas a práticas culturais distintas que afetam o nível de vestuário e atividade diária (WIJEWARDANE; JAYASINGHE, 2008). Um estudo realizado por Seong *et al.* (2015) comprovou que práticas culturais distintas influenciam nas condições de conforto térmico em um ambiente com piso radiante. Para chegar a tal conclusão, eles analisaram a sensação de conforto térmico dos ocupantes de apartamentos com aquecimento de piso na Coreia. O estudo comprovou que os costumes dos ocupantes variam na condição de conforto, pois apesar de muitos coreanos estarem adaptados com o uso de sofás e camas, ainda há os que preferem se sentar e dormir no chão. Dessa maneira, a temperatura do piso para que os ocupantes se sintam confortáveis é maior para os coreanos do que para os europeus e americanos, por exemplo, que não possuem esse costume.

Esse cuidado com a temperatura é extremamente importante, pois a temperatura interna de um ambiente está diretamente ligada ao conforto térmico dos ocupantes e ao consumo de energia. Desta forma, a temperatura do ambiente é uma grande preocupação para os construtores e pessoas que vivem e trabalham dentro de edificações. Algumas normas brasileiras e internacionais relacionam o conforto térmico com a temperatura para verificar se um ambiente está confortável ou não (NICOL; HUMPHREYS; S, 2012).

Segundo Olesen (2008), em sistemas radiantes é necessário levar em consideração o desconforto térmico local, que pode ser causado por assimetria da temperatura radiante, correntes de ar, diferenças verticais de temperatura do ar ou temperaturas da superfície do piso muito altas ou baixas.

2.1.2 Normatizações de Conforto Térmico

A maior parte dos países possuem legislações que estabelecem limites para a temperatura dos ambientes. Essas legislações possuem o objetivo de proteger a saúde e o bem-estar dos ocupantes (NICOL; HUMPHREYS; S, 2012). No Brasil, as normas de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) e a NBR 15220 (ABNT, 2005) apresentam recomendações quanto ao desempenho térmico das habitações.

A NBR 15220 (ABNT, 2005) estabelece um zoneamento bioclimático para o país, onde o território é dividido em oito zonas bioclimáticas. As cidades localizadas nas mesmas zonas bioclimáticas possuem um clima semelhante. Desta forma, cada zona bioclimática possui suas recomendações para otimizar o desempenho térmico das edificações.

A NBR 15575 (2013) é dividida em seis partes, onde cada parte diz respeito à um requisito diferente, como requisitos gerais, requisitos para sistemas estruturais, pisos internos, vedações verticais internas e externas, cobertura e sistemas hidrossanitários. As partes 1, 4 e 5 da norma de desempenho possuem requisitos para o desempenho térmico das edificações habitacionais. Esses requisitos são divididos de acordo com o grau de atendimento, sendo eles: mínimo, intermediário e superior.

No Reino Unido existe a Lei dos Escritórios, Lojas e Instalações (1963) que estabelece uma temperatura mínima para os ambientes de trabalho. Além dessas normas e legislações, também existem três padrões internacionais que são muito conhecidos e amplamente utilizados. Esses padrões se referem especificamente ao conforto térmico, como a ISO 7730 (2005), a ASHRAE 55 (2017) e a norma CEN EN15251 (2007). Tais normas estão sob revisão contínua, portanto, é necessário verificar sempre as últimas atualizações (NICOL; HUMPHREYS; S, 2012).

2.1.3 Conforto Térmico Segundo o Modelo Estático e Adaptativo

O modelo estático, produzido pelo dinamarquês Ole Fanger, assume que o corpo humano se encontra em estado de equilíbrio, ou seja, ele não acumula calor em seu interior. Dessa maneira, o modelo considera o homem como um simples receptor passivo do ambiente térmico. Esse modelo foi desenvolvido através de estudos em câmaras climatizadas. No interior dessas câmaras, o pesquisador controlava as variáveis subjetivas, pessoais e ambientais para desenvolver um ambiente mais confortável. Através da manipulação dessas variáveis, Fanger criou equações e métodos que são conhecidos mundialmente, tanto que serviram como base para

elaboração de algumas normas internacionais, como a ISO 7730 (2005). Entretanto, esse método começou a ser questionado por declarar que os limites de temperatura considerados como “confortáveis” não variam, ou sejam, são universais (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Devido a esses questionamentos, diversas pesquisas foram realizadas para tentar entender e aperfeiçoar alguns pontos falhos do método de Fanger. Essas pesquisas foram realizadas envolvendo situações reais do cotidiano das pessoas, onde elas desempenhavam as suas atividades diárias. Contudo, diferentemente do modelo estático, nestas pesquisas de campo não havia interferência do pesquisador nas variáveis pessoais e ambientais. A partir dessas pesquisas envolvendo a sensação térmica em ambientes reais, Michael Humphreys desenvolveu o modelo adaptativo (LAMBERTS *et al.*, 2016).

O modelo adaptativo baseia-se no princípio de que caso ocorra uma mudança que produza desconforto, as pessoas reagirão de maneira a restaurar seu conforto. Por isso, a necessidade de manter a temperatura corporal estável faz com que as pessoas busquem maneiras de atingir o conforto térmico. Essa temperatura corporal deve ser de aproximadamente 37°C para a saúde e bem-estar do ser humano. Para atingir essa temperatura, há diversos fatores que influenciam, como a exposição a condições e climas desconfortáveis, o perfil pessoal, como saúde, riqueza, idade e a forma como as pessoas administram suas vidas. Nesses casos, é utilizada a abordagem adaptativa, uma vez que essas interações envolvidas no sistema de conforto não podem ser totalmente exploradas no laboratório (NICOL; HUMPHREYS; S, 2012).

A abordagem adaptativa também tem sido utilizada para estimar os parâmetros de conforto em vários estudos de campo. Os estudos geralmente relatam a adaptabilidade térmica, o modelo de conforto térmico adaptativo e os desvios entre os modelos propostos com os casos de referência. A maior parte dos estudos estão relacionados às residências, escritórios, escolas, hospitais e espaços externos (LÓPEZ-PÉREZ; FLORES-PRIETO; RÍOS-ROJAS, 2019).

Um dos parâmetros de conforto analisados no modelo adaptativo são as temperaturas internas. Existem limites de temperatura onde qualquer grupo de pessoas pode se adaptar durante um determinado período. Esses limites estão relacionados tanto à experiência térmica quanto à fisiológica, sendo afetados pelo clima, contexto social, econômico e cultural. Para isso, devem ser fornecidos meios

de controle eficazes para que os ocupantes possam ajustar o ambiente térmico conforme as suas próprias necessidades. Todavia, esse modelo ignora o efeito da umidade e do movimento do ar (NICOL; HUMPHREYS; S, 2012).

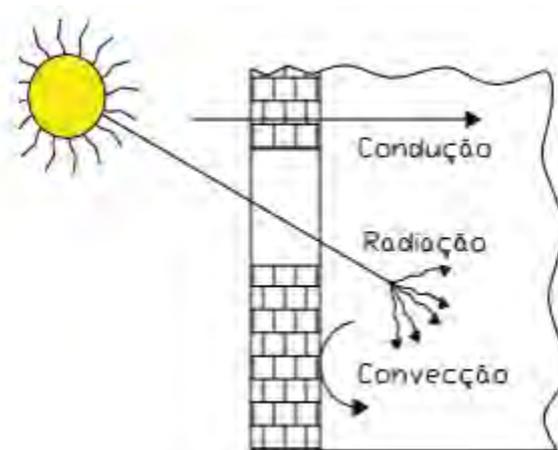
Para alcançar a temperatura desejada existem cinco ações adaptativas básicas, como: regular a taxa de geração interna de calor; regular a taxa de perda de calor corporal; regular o ambiente térmico; selecionar um ambiente térmico diferente e modificar as condições fisiológicas de conforto do corpo (NICOL; HUMPHREYS; S, 2012).

2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é um processo pelo qual a energia passa de um corpo quente para um corpo frio, ou seja, quando ocorre transferência de energia térmica de um corpo para outro, a propagação se faz do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Logo, essa transferência é um fenômeno unidirecional, sendo impossível inverter o processo sem necessitar de uma energia adicional.

Podem ocorrer três modos de transferência de calor: convecção, condução e radiação (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2014). A Figura 3 apresenta os três mecanismos de transferência de calor e as zonas onde elas podem ocorrer dentro de um edifício.

Figura 3 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios



Fonte: Valério (2007).

“A **condução** é um processo em que o calor flui de uma região de temperatura mais alta para uma região de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou até mesmo entre meios diferentes em contato físico direto” (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2014). Em líquidos e gases, a condução ocorre devido às

difusões e colisões das moléculas em seus movimentos aleatórios. No entanto, nos sólidos ela ocorre devido a combinação das vibrações das moléculas em rede, e a energia é transportada por elétrons livres. A taxa de condução de calor por um meio depende de diversos fatores, tais como: a diferença de temperatura a que o meio está submetido, a espessura, geometria e tipo de material. Lembrando que, quanto maior o isolamento, menor será a taxa de perda de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

“A **convecção** é o processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de um fluido. Ela é importante, principalmente, na transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás” (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2014). A movimentação de partículas é grande em um líquido, por isso a transmissão de calor por convecção ocorre quando as partículas aquecidas pelo contato direto de uma superfície sólida tendem a migrar para regiões do fluido onde a temperatura é mais baixa, transmitindo o calor para outras partículas. Logo, quanto mais rápido for o movimento de um fluido, maior será a transferência de calor por convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

“A **radiação** é definida como um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de baixa temperatura quando tais corpos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles” (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2014). Essa radiação emite energia pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas ou fótons como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas. Ao contrário da convecção e condução, na radiação a transferência de calor não exige a presença de um meio interveniente, sendo uma transferência mais rápida e que não sofre atenuação no vácuo (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

No piso radiante a transferência de calor ocorre por condução dentro do meio sólido, e por radiação e convecção entre as superfícies envolventes e o ambiente. Como a superfície sólida, ou seja, o piso, tem uma temperatura superior a temperatura do ar no ambiente, se produz um movimento constante do ar no interior da habitação. Isto ocorre pelo fato de que o calor transferido da superfície para o ar gera um aumento na densidade do ar, provocando seu movimento e removendo a camada aquecida por outra de menor temperatura. Logo, esse fenômeno ocorrido é chamado de convecção livre. Contudo, se esse movimento for provocado por uma causa externa, a convecção é chamada de convecção forçada (HOLMAN, 1999).

2.3 SISTEMA DE PISO RADIANTE

2.3.1 Panorama dos Sistemas de Piso Radiantes

A história dos sistemas radiantes é um estudo que envolve a antropologia, arqueologia e arquitetura. O aquecimento por piso radiante começou há milhares de anos. Muitas vezes o crédito pela criação desse sistema é dado aos antigos romanos, mas algumas pesquisas mostram que a Ásia é a mais antiga desenvolvedora desse sistema, precedendo os romanos por milhares de anos (BEAN *et al.*, 2010).

Esse sistema começou a ser desenvolvido na antiga Coreia através de lareiras de piso. As lareiras se localizavam no centro de cada residência e eram cercadas por longas pedras naturais, detritos de pedra ou um cinturão de barro lamacento, que melhoravam o efeito do armazenamento térmico após a extinção do fogo. Além de aquecer o ambiente, as lareiras também eram utilizadas para preparar as refeições (YEO; YANG; KIM, 2003).

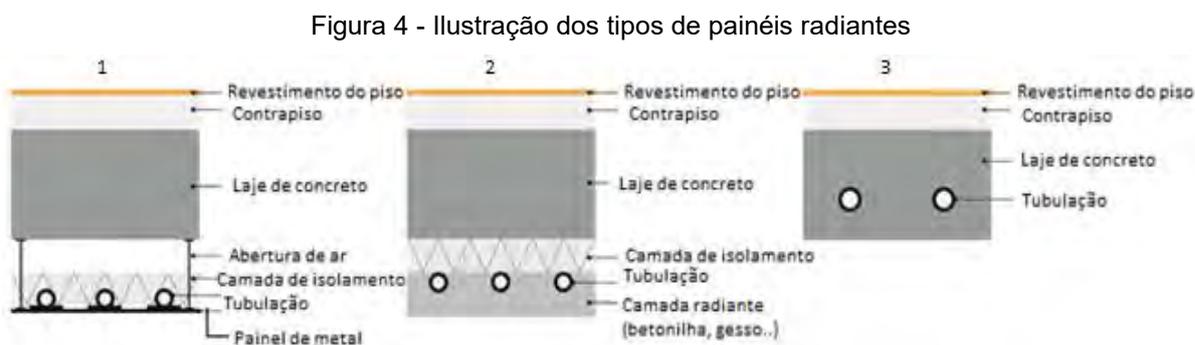
Após isso, os gregos e romanos criaram a sua versão de aquecimento radiante, similar aos sistemas utilizados pelos coreanos, denominado de “hipocausto”. Para a construção do “hipocausto” era necessário elevar o piso através de pilares de azulejos. Em seguida, um fogão a lenha era colocado abaixo do chão, na parte externa da residência. Assim, os gases quentes eram atraídos pelos pisos e acabavam aquecendo não só o piso, mas também as paredes, já que era deixado um espaço livre dentro delas. Posteriormente, o sistema de aquecimento continuou evoluindo na Ásia (BEAN *et al.*, 2010).

Somente em 1907 um professor britânico chamado AH Barker criou o primeiro sistema de aquecimento radiante real, o "painel radiante", que usava uma superfície como um piso ou teto para irradiar calor para o ambiente. Esse sistema de Barker era muito popular na Inglaterra, porém desapareceu durante a Primeira Guerra Mundial. Após a guerra, o Banco da Inglaterra conseguiu um novo sistema de aquecimento radiante hidráulico que foi instalado sob a direção do Dr. Oscar Faber. O sistema do Dr. Faber utilizava tubos de cobre embutidos em pisos de concreto ou tetos de gesso (SMITH; SWEET, 2006).

Já os sistemas de resfriamento de piso radiante surgiram mais tarde do que os sistemas de aquecimento de piso, tendo sido introduzidos em climas secos da Europa em meados do século XX. Eles foram empregados pela primeira vez na Copenhagen Opera House, onde as condições externas eram relativamente secas e frias e o único

objetivo do sistema de resfriamento do piso era remover o ganho de calor solar com a água circulando numa temperatura entre 15 a 18°C (OLESEN, 2008).

O sistema de piso radiante é definido como um sistema no qual a transferência de calor radiante cobre mais de 50% da troca de calor com um espaço condicionado (ASHRAE, 2016). Os sistemas radiantes são divididos em três tipos: (1) painéis radiantes, onde os tubos são colocados em painéis metálicos fixados à construção por meio de ganchos; (2) sistemas de superfície embutidos, onde os tubos são embutidos na superfície da laje/parede, mas isolados da estrutura e (3) sistemas de construção termicamente ativados (TABS), onde os tubos são embutidos na laje de concreto, ou seja, dentro da estrutura (KARMANN; SCHIAVON; BAUMAN, 2017). A Figura 4 ilustra as camadas que compõe os três tipos de sistemas radiantes.



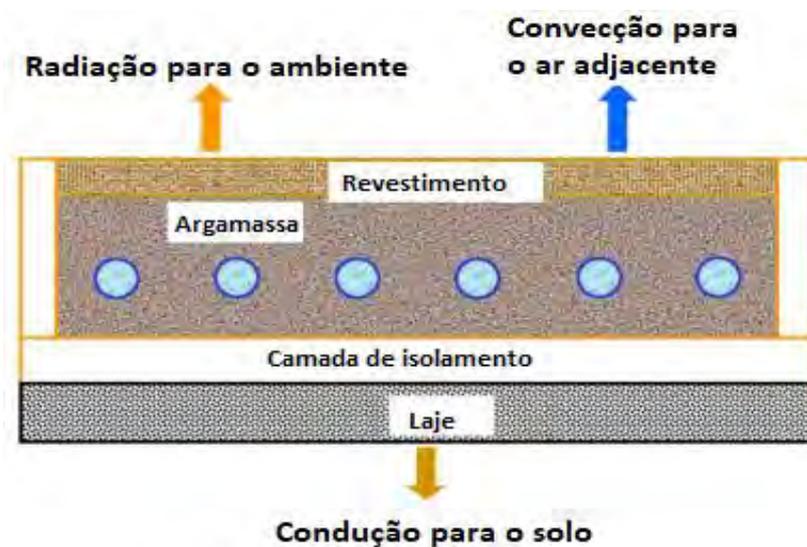
Fonte: Adaptado de Karmann, Schiavon e Bauman (2017).

O princípio do sistema é ativar a massa térmica do edifício para irradiar o calor para os ambientes. Nesse processo de troca de calor entre o sistema e o ambiente apenas os dez primeiros centímetros da laje estão ativos. O piso radiante pode fornecer um ambiente agradável no modo de aquecimento devido à convecção natural do ar aquecido pela água que circula nos tubos, enquanto apenas o resfriamento do piso pode ser insuficiente e, muitas vezes, requer um sistema de resfriamento adicional para ser integrado (YANG, 2013).

O piso radiante envolve diferentes mecanismos de transferência de calor. Os mecanismos de transferência de calor incluem a condução entre a laje e o solo, a radiação entre a superfície radiante e as superfícies circundantes, e a convecção entre a superfície radiante e a zona adjacente de ar, conforme ilustra a Figura 5 (LAOUADI, 2004). Através desses mecanismos, é possível produzir calor ou frio dependendo das

necessidades dos ocupantes. Porém, o sistema precisa ser configurado para atingir o efeito desejado (TEIXEIRA, 2010).

Figura 5 - Mecanismos de transferência de calor



Fonte: Adaptado de Laouadi (2004).

Atualmente os meios de distribuição de calor utilizados para aquecer ou resfriar o sistema de piso radiante são: água, ar e eletricidade. Eles funcionam de uma maneira diferente, mas possuem o mesmo objetivo: melhorar o conforto térmico do ambiente (BABIÁK; OLESEN; PETRAS, 2009).

O sistema de piso radiante elétrico funciona através do fornecimento de corrente elétrica a um cabo calefator (elétrico). Esses cabos normalmente são de cobre e instalados sob o piso. A função dos cabos é aquecer a massa térmica cimentícia que conduzirá energia ao revestimento do piso em contato com ela, fazendo com que ocorra o aquecimento do ambiente. Entretanto, para que o sistema tenha um bom desempenho é necessário avaliar alguns parâmetros que influenciam na eficiência do sistema, como o tipo de revestimento do piso, o espaçamento entre os cabos e o seu controle. Para o controle da temperatura, esse sistema costuma utilizar termostatos localizados nas paredes, preferencialmente onde eles não sejam afetados pela luz solar direta (DRAKE, 1989).

O sistema de piso radiante a ar opera através do fornecimento do ar aquecido ou resfriado no interior da tubulação. A principal vantagem da utilização do ar é que não há nenhum meio intermediário ou trocador de calor, além disso, não há risco de vazamento de água. Todavia, as principais desvantagens são o grande volume de ar

necessário, o tamanho da tubulação e o alto consumo de energia dos ventiladores. Esse sistema de aquecimento pode ser combinado com ventilação mecânica ou ar condicionado (CIBSE, 2016). Um estudo realizado por Bozkir e Canbazoglu (2004) mostrou que esse sistema tem uma baixa eficiência de aquecimento comparado com o piso radiante hidráulico. O piso radiante a ar pode ser utilizado como uma forma alternativa em relação ao sistema hidráulico, mas para que isso ocorra é necessário a existência de fontes de calor disponíveis, como gases de exaustão ou chaminés.

2.3.2 Piso Radiante Hidráulico

O sistema de piso radiante hidráulico funciona através da circulação da água no interior das tubulações embutidas no piso. No caso do aquecimento, a água quente é transportada pela tubulação, fazendo com que o calor irradie do piso aquecido através da convecção natural, aquecendo pessoas e objetos. No caso do resfriamento, a água fria circula no interior da tubulação, contudo o processo de transferência de energia ocorre de forma reversa em relação ao aquecimento. No resfriamento ocorre a absorção do calor do espaço. Esse calor transferido pelo piso é removido do espaço através da água fria que circula dentro das tubulações (REHAU, 2017).

A instalação do sistema não é difícil, mas se instalado de maneira incorreta pode causar uma perda na eficiência do mesmo. Para instalar o sistema é necessário colocar uma camada de isolamento sobre o piso regularizado, que é imprescindível para reduzir a inércia térmica e evitar a perda de calor para os ambientes não climatizados. Além disso, a camada de isolamento também servirá como uma barreira anti-umidade, evitando a umidade por capilaridade. Depois, tubos em polietileno reticulado (PEX) são fixados sobre a camada de isolamento. Esses tubos normalmente são fixados em formato de serpentina para que ocorra uma melhor distribuição da temperatura. Após a fixação dos tubos, deve-se preencher com uma camada de argamassa para a execução do contrapiso. Por fim, é colocado o revestimento desejado (RASTELLO, 2013).

2.3.3 Parâmetros de Projeto de Pisos Radiantes Hidráulicos

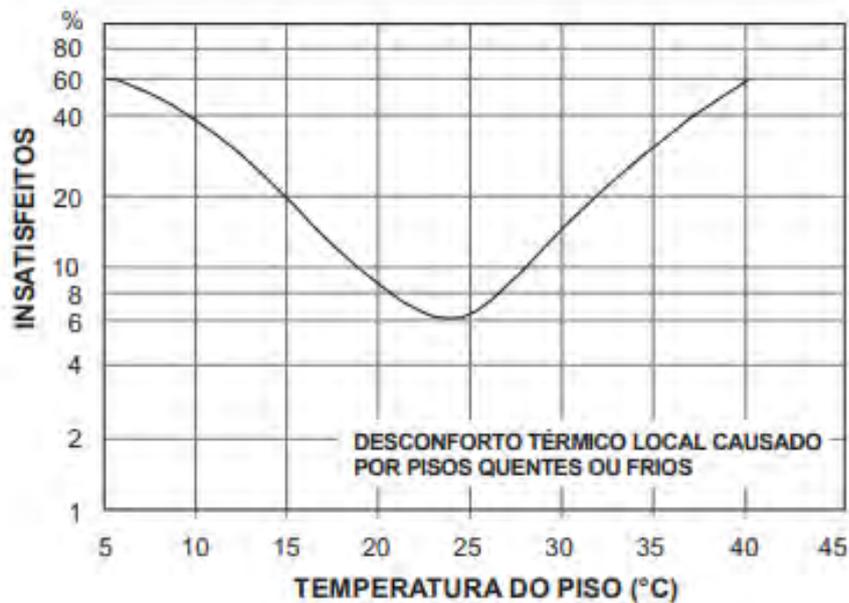
Devido à complexidade do sistema, é importante avaliar e entender os parâmetros de projeto, como a temperatura da água, a temperatura da superfície, o espaçamento entre os tubos, o layout dos tubos e a escolha dos materiais.

Temperatura da água: A temperatura da água influencia diretamente na temperatura da superfície do piso e do ambiente. Em casos de aquecimento do piso, a ASHRAE (2016) recomenda que a temperatura da água que circula no interior dos tubos seja de aproximadamente 90°F (32,2°C). Entretanto, essa temperatura vai depender da resistência ao calor do acabamento final do piso. Nos casos de resfriamento do piso, Olesen (2016) recomenda que a temperatura da água varie entre 16°C à 23°C. A temperatura de resfriamento deve ser controlada para evitar a condensação da superfície. Portanto, essa temperatura é limitada de acordo com o ponto de orvalho.

Temperatura da superfície: Para um bom funcionamento do sistema é fundamental levar em consideração a temperatura da superfície do piso. Como os pés estão diretamente em contato com o piso, uma temperatura muito elevada ou muito baixa pode causar um grande desconforto aos ocupantes. Por isso, alguns padrões internacionais recomendam uma faixa de temperatura da superfície de 19 °C a 29 °C para garantir o conforto térmico e não colocar a saúde do usuário em risco. Sendo assim, a temperatura para o aquecimento não deve ser superior à 29 °C, e para o resfriamento não deve ser inferior à 19°C (ASHRAE, 2016). Para Olesen (1982) a temperatura da superfície é mais relevante quando as pessoas se encontram descalças devido às preocupações relacionadas à saúde e segurança dos usuários.

A Figura 6 comprova a influência da temperatura da superfície do piso no desconforto térmico local causado por pisos quentes ou frios. Como pode-se observar, temperaturas da superfície muito baixas ou muito altas acabam resultando em uma alta porcentagem de usuários insatisfeitos. De acordo com a ASHRAE (2016), os valores apresentados na Figura 6 são recomendados para pessoas com calçados nos pés e que não estejam sentadas no chão.

Figura 6 - Desconforto térmico local causado por pisos quentes ou frios

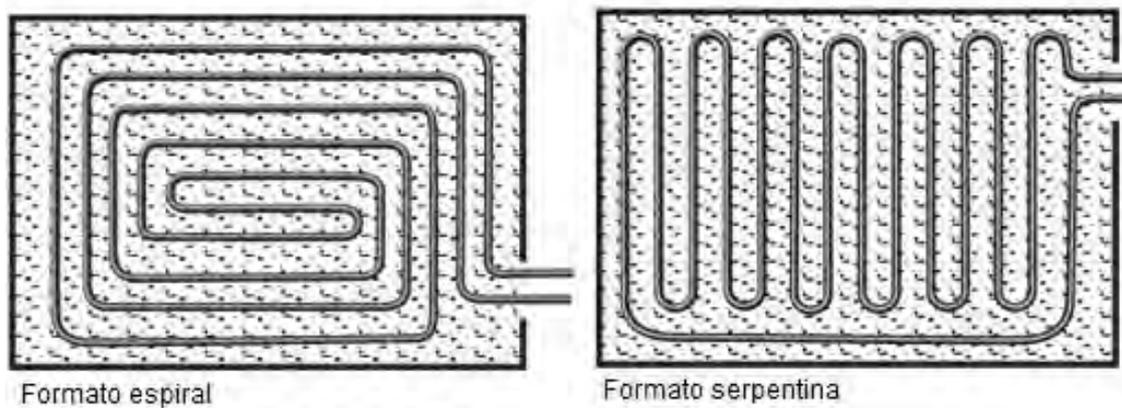


Fonte: ASHRAE (2016).

Espaçamento entre os tubos: O espaçamento da tubulação é uma variável que influencia diretamente no desempenho do sistema. Os tubos menos espaçados melhoram a uniformidade da temperatura da superfície do piso e reduzem a temperatura da água, resultando em um tempo de resposta mais rápido e em uma maior eficiência energética. Nos casos de aquecimento do piso, tubos com espaçamento muito grande podem fazer com que esses locais mais espaçados fiquem frios, ou seja, a distribuição da temperatura não ocorrerá de forma homogênea (REHAU, 2017).

Layout do piso: Os tubos podem ser instalados em diferentes formatos, como por exemplo, o formato espiral de contrafluxo, também chamado de caracol, e o formato serpentina. A diferença entre eles é que o formato espiral possui menos restrições em relação ao raio de curvatura, permitindo um espaçamento menor entre os tubos e distribuindo o calor de maneira mais uniforme que o formato em serpentina (REHAU, 2017). A Figura 7 mostra como ocorre a disposição dos tubos em formato de espiral de contrafluxo e em formato de serpentina.

Figura 7 - Layout dos tubos em forma de espiral e serpentina



Fonte: Adaptado de Rehau (2017).

Escolha do material do tubo: A escolha do material do tubo também é um fator importante para o desempenho e vida útil do sistema. De acordo com a ASHRAE (2016), antigamente o sistema de piso radiante hidráulico utilizava tubos em cobre, mas as juntas soldadas acabavam falhando e a expansão e contração do concreto corroíam os tubos, causando vazamentos. Dessa forma, os tubos de cobre começaram a ser substituídos pelos tubos em PEX, que possuem uma barreira de difusão de oxigênio, evitando a corrosão nos conectores ferrosos entre a tubulação e o sistema de distribuição. Essa corrosão é causada pelo oxigênio presente no interior dos tubos.

Escolha do material de isolamento: O material de isolamento comumente utilizado nesse sistema é o EPS (poliestireno expandido). Um estudo realizado por Jeong e Jung (2015) mostrou que os materiais de isolamento utilizados em pisos radiantes devem ser selecionados com base na correlação entre a densidade e a condutividade térmica dos materiais, pois à medida que a densidade dos materiais resilientes feitos de EPS aumenta, a condutividade térmica tende a diminuir proporcionalmente.

2.3.4 Formas de Aquecimento

Um sistema de aquecimento é constituído pela fonte de energia (combustível), gerador de calor (caldeira, bomba de calor, etc.), emissor de calor (radiadores, painéis radiantes, etc.) e o meio de distribuição do calor (ar, água, etc.). A escolha da fonte de energia para aquecer o piso é feita de acordo com a disponibilidade local; o custo do combustível; o custo de operação, instalação e manutenção; a possibilidade de

financiamento por parte do governo; o impacto ambiental (emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes); o espaço necessário para o armazenamento; e as questões de saúde e segurança (CIBSE, 2016).

A disponibilidade local é a capacidade de acessar uma fonte de energia específica. Além do mais, ela é o principal fator a ser levado em consideração na escolha da fonte de energia. Por exemplo, embora grande parte do Reino Unido seja atendido por uma rede nacional de gás, há algumas áreas onde a capacidade de entrega é baixa. No entanto, onde a conexão com a rede é possível, o gás natural é o combustível mais utilizado para o aquecimento. A utilização do gás natural, nesse caso, acaba sendo uma boa opção devido ao seu baixo custo e impacto ambiental. Além da disponibilidade local, outro fator importante é o custo do combustível. O custo do combustível provavelmente sofrerá variações durante a vida útil da instalação. Portanto, deve-se levar em consideração os possíveis aumentos futuros nas tarifas dos combustíveis (CIBSE, 2016).

Uma das formas de aquecimento da água é através das caldeiras. As caldeiras possuem a vantagem de serem comercializadas em diversos tamanhos, o que reduz os problemas relacionados ao espaço necessário para o armazenamento. Além disso, elas são uma das fontes mais comuns de geração de calor devido à sua simplicidade, compactidade e baixo custo por kW. Diversas fontes de energia podem ser utilizadas para abastecer as caldeiras, como biocombustíveis, gás natural, lenha, pellet, gás liquefeito de petróleo, óleos leves e pesados (SARBU; MIRZA; CRASMAREANU, 2017).

Na escolha da caldeira deve ser levado em consideração alguns fatores, tais como: a facilidade de instalação; a facilidade de substituição, se necessário; a facilidade de utilização dos usuários; o nível de ruído e de emissão de gases poluentes; a velocidade de resposta; o custo de implantação e o consumo a longo prazo. O consumo a longo prazo é considerado porque existem caldeiras que são mais caras de serem implementadas, mas possuem um consumo menor a longo prazo. Por isso, a escolha da caldeira a ser utilizada deve ser feita de forma consciente, levando em consideração esse consumo a longo prazo (CIBSE, 2016).

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com a sua temperatura e pressão de operação. As temperaturas variam de baixas, médias e altas, conforme mostra a Tabela 1. Já a pressão deve ser mantida acima da pressão de saturação da

água em todos os pontos do sistema, a fim de evitar a irradiação de vapor e permitir uma margem de segurança razoável.

Tabela 1 - Classificação da temperatura dos sistemas aquecidos por água

Categoria	Temperatura (°C)
Baixa	< 90
Média	90 -120
Alta	> 120

Fonte: CIBSE (2016).

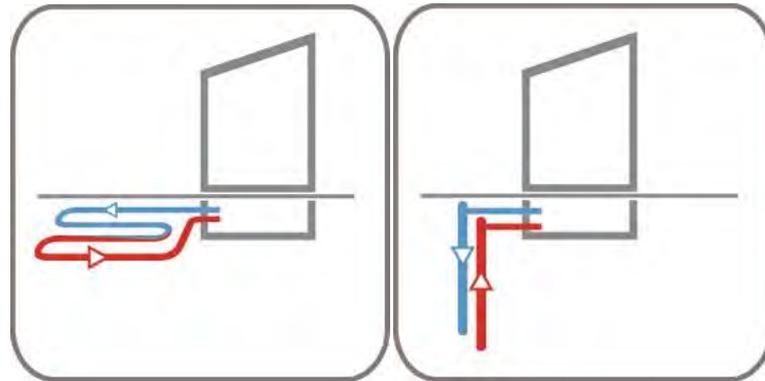
Outra forma de aquecer a água é através de bombas de calor de fonte subterrânea. As bombas de calor são muito eficientes em termos de energia, pois podem utilizar fontes de calor renováveis. Esses sistemas utilizam bombas de calor que coletam e transferem o calor armazenado no solo através de tubos enterrados e cheios de fluido. Para obter a temperatura necessária, a energia térmica da fonte de calor (solo, ar ou água subterrânea) é levada para a bomba de calor, onde a temperatura é elevada e o calor é transferido para o sistema de aquecimento central (MUSTAFA, 2008).

2.3.5 Formas de Resfriamento

Os sistemas de bombas de calor de fonte subterrânea ou sistemas geotérmicos também podem resfriar a água. Nesse caso, as bombas de calor operam ao contrário do aquecimento, transferindo o calor para fora da casa, onde o solo mais frio absorve o excesso de calor. Essa solução é atraente porque pode ser utilizado um único sistema para o aquecimento e o resfriamento. Além do mais, esse sistema não utiliza combustão e reduz em até 75% o consumo de eletricidade em comparação com os sistemas convencionais de aquecimento e resfriamento (MUSTAFA, 2008).

A energia geotérmica pode ser utilizada em sistemas fechados instalados horizontalmente ou verticalmente, como mostra a Figura 8. Os critérios para selecionar o sistema apropriado estão relacionados às características do edifício e às condições externas, como a área disponível, a qualidade do solo, a característica e o fluxo da água subterrânea (BOCKELMANN; PLESSER; SOLDATY, 2013).

Figura 8 - Disposição dos trocadores de calor (horizontal e vertical)



Fonte: Bockelmann, Plesser e Soldaty (2013).

Devem ser retiradas amostras de solo para determinar as suas propriedades, tais como: condutividade térmica, temperatura, densidade e teor de umidade. Essas propriedades e características são essenciais na elaboração do projeto do sistema geotérmico. Todavia, a retirada das amostras não é suficiente para avaliar as condições e o fluxo da água subterrânea. Em razão disso, é recomendado que sejam realizadas simulações computacionais para dimensionar o sistema com maior precisão (BOCKELMANN; PLESSER; SOLDATY, 2013).

2.4 NORMAS E MANUAIS

As normas e manuais relacionados ao sistema de piso radiante hidráulico são de extrema importância, pois elas orientarão como esse sistema deve ser projetado, instalado e controlado para que não ocorram intercorrências e a saúde dos ocupantes não seja colocada em risco (LIM; KIM, 2016). Algumas normas regulamentadoras e manuais indicam como deve ser realizado o projeto, instalação e controle do sistema. Como exemplo, pode-se citar a ISO 11855 (ISO, 2018), a EN-1264 (EN, 2009a), o manual da ASHRAE (ASHRAE, 2016) e o manual da REHAU (REHAU, 2017).

A ISO 11855 (ISO, 2018) especifica os critérios de conforto, projeto, dimensionamento, instalação, controle e capacidade de resfriamento e aquecimento dos sistemas de pisos radiantes hidráulicos. Essa norma é aplicável a sistemas embutidos na superfície e sistemas termo ativos (TABS), que são integrados na parede, no piso ou no teto. A ISO 11855 (ISO, 2018) é válida para sistemas de aquecimento e resfriamento de superfície em edifícios residenciais, comerciais e industriais.

Através da norma europeia EN 1264 (EN, 2009a) pode-se determinar a capacidade de aquecimento e resfriamento das superfícies de paredes, tetos e pisos. Essa norma é dividida em 5 partes, onde são abordados as definições, símbolos, métodos para determinação de aquecimento e resfriamento, dimensionamento e instalação do sistema de piso radiante hidráulico.

A norma EN 15377 (EN, 2008) é aplicável a sistemas de aquecimento e refrigeração de superfície à base de água em edifícios residenciais, comerciais e industriais. Os métodos se aplicam a sistemas integrados na construção de parede, piso ou teto, sem nenhuma abertura de ar. Essa norma é dividida em 3 partes, sendo uma das partes referentes ao uso de energia renováveis em conjunto com o sistema radiante. A Tabela 2 apresenta as partes que compõe as normas EN 1264 e 15377.

Tabela 2 - Partes que compõe as normas EN 1264 e EN 15377

Norma	Parte	Definição
1264	1	Definições e símbolos
	2	Aquecimento de piso – Determinação da produção térmica usando métodos de cálculo e teste
	3	Dimensionamento
	4	Instalação
	5	Superfície de aquecimento e refrigeração em pisos, tetos e paredes. Determinação da saída térmica
15377	1	Métodos de cálculo em estado estacionário para determinação da capacidade de aquecimento e refrigeração
	2	Método para projeto, dimensionamento e instalação
	3	Otimização para uso de fontes renováveis de energia

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O manual da ASHRAE – Sistemas HVAC e Equipamentos (ASHRAE, 2016) trata dos princípios dos sistemas radiantes, dos cálculos de transferência de calor, da manutenção do sistema, das considerações gerais de projeto (temperatura da água, temperatura da superfície do piso, diâmetro dos tubos, etc.) e do controle. Ademais, a norma menciona algumas vantagens e desvantagens do sistema.

A REHAU (2017) também elaborou um manual que inclui todos os tipos de sistemas radiantes. Nesse manual é possível entender como funciona o controle, a

capacidade de aquecimento e resfriamento, as operações e instalações do sistema de resfriamento a baixas temperaturas e sistemas de resfriamento a altas temperaturas.

2.4.1 Norma Europeia EN 1264

2.4.1.1 Limites de Temperatura

A EN 1264-3 (EN, 2009b) especifica os limites de temperatura da água que percorre no interior das tubulações. Segundo as especificações, a temperatura da água não deve ser superior à 45°C nos casos de aquecimento em pisos frios. Para os pisos que possuem material de revestimento isolante, como é o caso das madeiras e carpetes, essa temperatura não deve exceder os 55°C.

Para obter um maior conforto térmico é importante que a variação de temperatura da água de fornecimento e retorno seja pequena. A EN 1264-3 (EN, 2009b) limita essa variação entre 0°C e 5°C, enquanto a temperatura máxima de ida depende da diferença de temperatura admitida entre o pavimento e o ambiente. No sistema de resfriamento a norma especifica que a temperatura em torno dos tubos não deve atingir o ponto de orvalho.

2.4.1.2 Instalação

De acordo com a EN 1264-4 (EN, 2009c), para a instalação de um sistema de aquecimento ou resfriamento de piso é necessário que todas as instalações elétricas e sanitárias estejam prontas. Além dessas instalações, também é recomendado que as aberturas, como portas e janelas, já estejam instaladas.

Para começar a instalação é preciso que a laje, ou também chamada de base de suporte, esteja nivelada e acabada. Então, o primeiro passo é colocar uma tira isolante periférica ao longo das paredes. Essa tira periférica deve estar firmemente fixada à uma base de apoio, que podem ser as molduras das portas, colunas ou tirantes. A tira isolante periférica deve subir a partir da base de suporte para a superfície do chão acabado e permitir um movimento de pelo menos 5 mm. No caso de múltiplas camadas isolantes, a tira isolante periférica deve ser colocada antes da aplicação da camada de isolamento. A parte superior da tira isolante periférica, que sobe ao longo da parede, não deve ser cortada até a colocação do revestimento final do pavimento.

Após a colocação das tiras isolantes periféricas, são instaladas as camadas de isolamento, onde os painéis isolantes devem ser unidos firmemente. Depois da instalação da camada de isolamento, a norma recomenda que seja colocada uma camada protetora acima da camada de isolamento. Essa camada protetora consiste em um filme de polietileno com uma espessura mínima de 0,15 mm. Para evitar a infiltração de argamassa, a tira isolante periférica deve ser firmemente fixada à camada de isolamento ou à camada protetora.

Após a colocação da camada protetora, os tubos são fixados sobre ela. Esses tubos podem ser em PVC, PP, PB, PE-X, e devem atender as suas respectivas normas técnicas. É recomendado que sejam utilizados tubos com uma camada que sirva como barreira do oxigênio. Essa camada de barreira do oxigênio é importante para proteger o sistema contra a corrosão. Além do mais, os tubos devem ser transportados, armazenados e manuseados com cuidado para evitar danificações. No caso dos tubos de plástico, é importante ter um cuidado maior para que eles não sejam armazenados em locais com luz solar direta. Esses tubos devem ser colocados a uma distância de 50 mm das estruturas verticais e 200 mm de lareiras, paredes e poços de elevador.

Depois de fixados os tubos, é realizado o teste de vazamento. Esse teste deve ser feito antes que seja colocada a camada de argamassa sobre a tubulação, pois caso contrário, será necessário quebrar todo o piso para verificar as possíveis intercorrências. O teste de vazamento é uma forma de verificar a pressão, e pode ser feito utilizando água ou ar comprimido. A pressão de ensaio não deve ser inferior a 4 bar e nem superior a 6 bar. Por fim, depois de instaladas as tiras isolantes periféricas, a camada de isolamento, a camada protetora, a tubulação e realizado o teste de vazamento, deverá ser instalada a camada de argamassa sobre os tubos. Essa camada de argamassa servirá como uma forma de regularizar o contrapiso.

A espessura da camada de argamassa colocada sobre a tubulação e a temperatura do ambiente devem ser controladas, para que o sistema tenha um bom desempenho. Segundo as recomendações da norma, para uma argamassa convencional deve-se utilizar uma espessura de 30 mm. Caso seja uma argamassa especial, a norma permite utilizar uma espessura inferior, desde que esteja de acordo com as recomendações do fornecedor da argamassa. Quanto à temperatura do ambiente, ela não deve ser inferior a 5°C durante pelo menos 3 dias.

2.4.1.3 Segurança do Sistema

É recomendada a utilização de um dispositivo de segurança nos sistemas de aquecimento e resfriamento de piso.

Em sistemas de aquecimento de piso, esse dispositivo de segurança operará mesmo na ausência de energia elétrica, cortando o fornecimento do calor no circuito de aquecimento. O dispositivo deverá cortar o fornecimento do calor quando a temperatura em torno dos elementos exceder os 55°C. Já nos sistemas de resfriamento deve ser utilizado um dispositivo de sensor de ponto de orvalho. Esse dispositivo é necessário para interromper o fluxo de água fria imediatamente antes da formação de condensação.

Além da utilização dos dispositivos de segurança, deve ser instalado pelo menos um circuito por ambiente aquecido ou resfriado, pois permitirá o controle da temperatura de maneira manual ou automática. Cada um dos circuitos deve ter duas válvulas de bloqueio e um dispositivo de balanceamento.

2.5 SISTEMAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA

Existem diversas estratégias de controle dos sistemas radiantes. Elas podem ser classificadas como controle da temperatura da água e controle operacional da bomba, que se refere ao controle de energia. A estratégia de controle tem influência no design e desempenho do sistema, contudo, existem várias formas de controle que não podem ser determinadas no estágio de projeto (YANG, 2013).

Para um bom desempenho do sistema de piso radiante é necessário ter um bom controle da temperatura do ambiente. Além dos benefícios energéticos, é importante que os ocupantes possam ajustar individualmente a temperatura do ambiente para um maior conforto térmico. Uma das formas de ajustar a temperatura individualmente é através dos termostatos. Os termostatos individuais controlam a temperatura da água separadamente, ou seja, os ambientes não precisam estar necessariamente com a mesma temperatura, podendo, assim, ser controlados conforme a necessidade. Por isso, o controle da temperatura é importante tanto no resfriamento quanto no aquecimento do ambiente (OLESEN, 2002).

Segundo Lim e Kim (2016), a ISO 11855 classifica o sistema de controle de acordo com o nível de desempenho, podendo ser:

- Manual: quando o fornecimento de energia para o espaço condicionado é controlado apenas por um dispositivo operado manualmente;

- Automático: quando um sistema ou dispositivo adequado controla automaticamente os espaços condicionados;
- Por temporização: quando a função de energia fornecida a um espaço condicionado é desligada ou reduzida durante períodos programados;
- Por temporização avançada: quando a função de fornecimento de energia ao espaço condicionado é desligada ou reduzida durante períodos programados, como em dias com tarifa de eletricidade mais cara.

A definição das estratégias de controle traz diversos desafios, como por exemplo, para aquecer cada ambiente com uma temperatura diferente é necessário que cada circuito possua uma válvula de mistura de três vias. Esse método tem limitações, já que é necessário um espaço extra, além do custo para instalação da válvula de mistura de três vias ser mais elevado. Na prática, é comum que a temperatura da água de abastecimento seja determinada pela maior carga de aquecimento, e então, todos os demais ambientes recebem a água na mesma temperatura (RHEE *et al.*, 2010).

Para Bockelmann, Plessner e Soldaty (2013), há algumas formas de estratégia de controle para os sistemas termoativos, como:

- Controlar a temperatura de fornecimento da água utilizando um ponto de ajuste constante, ou controlar em função da temperatura do ar do ambiente;
- Controlar a temperatura de retorno em função da temperatura do concreto;
- Controlar a operação das bombas em função de horários pré-definidos, de forma intermitente.

A estratégia de controle intermitente opera o sistema de piso radiante hidráulico somente durante um certo número de horas prescritas durante o dia. Essa estratégia melhora a eficiência energética dos edifícios, eliminando o custo do termostato e do hardware de controle associado, por isso é muito atrativa e utilizada em edifícios na Coreia. Entretanto, essa estratégia é bem conservadora nas suas recomendações em relação ao número de horas de fornecimento de calor, fazendo com que resulte em maior consumo de energia (CHO; ZAHEER-UDDIN, 2003).

Nos sistemas de resfriamento, uma das grandes preocupações é a ocorrência de condensação na superfície do piso. Em razão disso, as temperaturas da superfície devem ser controladas. Para evitar a ocorrência de condensação, a temperatura da superfície não deve ser inferior à temperatura mais alta do ponto de orvalho. O ponto

de orvalho também pode ser manipulado com a redução da umidade do ar. Todavia, na prática, a prevenção da condensação reduz, aproximadamente, 2°C a diferença efetiva de temperatura de resfriamento (FEUSTEL; STETIU, 1995).

O estudo de Joe e Karava (2019) mostrou que os pisos radiantes hidráulicos utilizados com estratégias de controle adequadas são capazes de reduzir o consumo de energia em até 50% para o resfriamento do ambiente e 29% para o aquecimento, quando comparados com o sistema de ar condicionado convencional.

2.6 ESTUDOS COM USUÁRIOS EM EDIFÍCIOS REAIS E LABORATÓRIOS

Há duas métricas que são essenciais para avaliar o conforto térmico de sistemas radiantes. Essas métricas são classificadas em duas categorias: métricas objetivas, que são baseadas em medições físicas, e as métricas subjetivas, que levam em consideração a opinião dos ocupantes (KARMANN; SCHIAVON; BAUMAN, 2017).

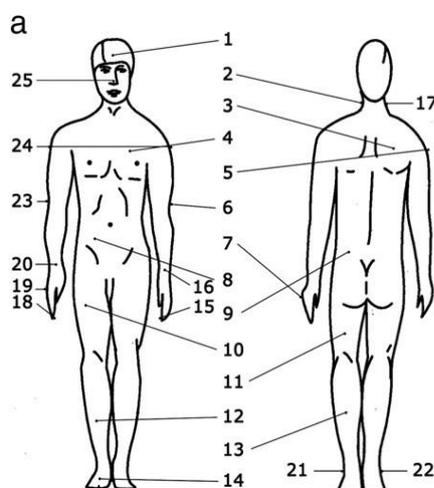
Zeiler e Boxem (2009) realizaram um estudo para verificar o conforto térmico em escolas na Holanda. Essas escolas eram equipadas com diferentes tipos de sistemas de ventilação e aquecimento. Nesse estudo foram comparadas escolas com sistemas termoativos e sistemas de exaustão mecânica. Foram realizadas medições da temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa e velocidade do ar. Além disso, também foram entregues questionários aos alunos e professores. Os resultados mostraram que os sistemas termoativos garantiram uma temperatura interna aceitável, fazendo com que os usuários ficassem mais satisfeitos com esse sistema em relação às soluções de aquecimento tradicionais.

Causone *et al.* (2010) avaliaram um sistema de aquecimento e resfriamento de piso radiante com ventilação de deslocamento. Para a realização do estudo, foram feitas medições de temperatura e velocidade do ar, temperatura da superfície e concentração de gás carbônico em uma câmara de teste. De acordo com os resultados, o aquecimento do piso com ventilação de deslocamento garantiu altos níveis de qualidade do ar interno. Também foi possível observar que, embora tenha aumentado as diferenças verticais de temperatura do ar, o resfriamento do piso não aumentou o risco de desconforto no nível do tornozelo, comumente ocorrido nos sistemas de ventilação de deslocamento.

Schellen *et al.* (2012) investigaram as diferenças de gênero em relação a termofisiologia e ao conforto térmico durante o resfriamento convectivo e radiante. Para isso, dez mulheres e dez homens com idades entre 20 e 29 anos foram expostos

aos dois sistemas de resfriamento através de uma câmara climática. Primeiro foi calculado o PMV (voto médio predito), e em seguida foram realizadas algumas medições físicas e fisiológicas, como a medição da temperatura da pele, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar, temperatura da superfície, temperatura média radiante e iluminância. Além dessas medições, foram entregues questionários para avaliar os votos de sensação térmica globais e locais para cada parte do corpo, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Locais de medição para avaliação da sensação térmica e conforto



Fonte: Schellen *et al.* (2012).

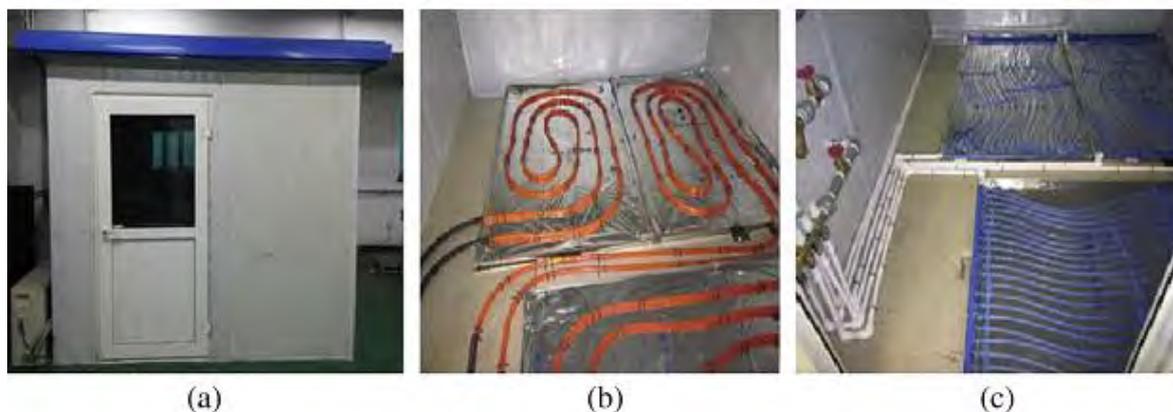
Os resultados mostraram que os sujeitos de ambos os sexos sentiram mais frio do que o previsto. Tanto no resfriamento convectivo, quanto no resfriamento radiante, as mulheres sentiram-se mais desconfortáveis e insatisfeitas nas mesmas condições ambientais, em comparação com os homens. Porém, esse desconforto foi menor com o resfriamento radiante em comparação ao resfriamento convectivo. O estudo também mostrou que a sensação térmica local e a temperatura da pele das extremidades das mãos das mulheres são de alta importância para a sensação térmica do corpo, enquanto essa relação não é tão significativa para os homens.

Sastry e Rumsey (2014) realizaram um estudo em um edifício que possuía dois sistemas de resfriamento, um radiante, com um sistema dedicado ao tratamento do ar exterior (DOAS), e um com volume de ar variável (VAV). Foram utilizados medidores de vazão e sensores de temperatura para observar a eficiência instantânea do sistema. Além disso, a equipe de projeto mediu a temperatura, umidade, velocidade do ar, temperatura média radiante e entregou questionários aos usuários para avaliar

a qualidade e o conforto do ar. Após um ano de operação, analisaram-se os dados de energia e mediram-se a qualidade do ar interno e as condições de conforto. Quanto ao consumo, os resultados mostraram que o sistema de resfriamento radiante com DOAS consumiu 34% a menos de energia. Através das medições e dos questionários entregues, concluiu-se que o resfriamento radiante obteve uma porcentagem de insatisfação menor em comparação com o resfriamento com VAV.

Zhou e He (2015) investigaram o desempenho de um sistema de aquecimento radiante com dois tipos de tubos: tubos de polietileno e material capilar, conforme mostra a Figura 10 (b) e (c). Para a realização desse trabalho, foi criada uma sala de teste, como ilustra a Figura 10 (a), para medir a taxa de fluxo, a temperatura de entrada e retorno da água, a temperatura do ar e a temperatura da superfície e demais camadas que compõe o piso radiante. Os resultados do estudo mostraram que em comparação com os tubos de polietileno, o tapete capilar forneceu uma distribuição de temperatura mais uniforme, além de atingir a temperatura confortável (acima de 19°C) em menos tempo. Quanto à taxa de armazenamento de calor dos tubos de aquecimento, concluiu-se que o tapete capilar possui maiores taxas de armazenamento de calor, quando comparado com os tubos em polietileno.

Figura 10 - Desenvolvimento do método através da sala de testes
(a) sala de teste (b) tubos em polietileno (c) material capilar



Fonte: Zhou e He (2015).

Seong *et al.* (2015) avaliaram o desempenho térmico em edifícios coreanos com sistema de aquecimento de piso radiante com baixa temperatura. A sensação de conforto dos ocupantes foi analisada através de questionários e medições. Esse estudo revelou que os ocupantes que possuíam o costume de utilizar camas e sofás sentiram-se confortáveis com a superfície do piso a uma temperatura de 29 °C, enquanto a temperatura ambiente estava a cerca de 22 °C. Essas temperaturas

representam uma temperatura consciente da energia. Todavia, os ocupantes que dormiam no chão sentiram-se confortáveis a uma temperatura superior aos limites das normas internacionais, o que conseqüentemente acarretou maior consumo de energia.

Zhang *et al.* (2017) analisaram um sistema de piso aquecido através de uma bomba de calor de fonte subterrânea em um edifício comercial. As bombas de calor transferiam a energia do solo para a água, aquecendo a água que passava pelos tubos. Foram realizadas medições de temperatura e umidade para a verificação do desempenho térmico. O estudo mostrou que quando as bombas de calor não estão ligadas, o tanque de armazenamento é capaz de liberar o calor residual durante dois dias. O estudo também concluiu que esse sistema economiza energia quando as bombas de calor são acionadas nos horários de menor pico de energia. Além do mais, o sistema é capaz de economizar os custos de operação e atender às necessidades do conforto térmico interno.

Ma *et al.* (2017) compararam o desempenho de um piso radiante aquecido com caldeira e um piso radiante aquecido com uma unidade de bomba de calor subterrânea com assistência solar. O sistema com a bomba de calor utiliza, alternadamente, a energia solar e as águas subterrâneas como fonte de calor de baixa temperatura. Essa temperatura varia de acordo com a temperatura da água no tanque de armazenamento. O estudo utilizou uma sala em um laboratório para simular o comportamento de um apartamento em Tianjin. Foram realizadas medições de temperatura interna e externa do ar, temperatura da água, consumo de energia dos equipamentos elétricos e entre outros parâmetros. Os resultados mostraram que o sistema de piso radiante aquecido pela energia geotérmica e solar é capaz de reduzir o consumo de energia em 30,55% em comparação com o sistema aquecido por caldeiras.

2.7 ESTUDOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO

Nos últimos 30 anos, a importância da simulação do desempenho energético das construções tornou-se cada vez mais óbvia na pesquisa sobre os sistemas termo ativos. O desempenho desse sistema está fortemente relacionado aos detalhes do projeto e estratégias de controle, que podem ser modeladas em vários pacotes de *software* de simulação, como ESP-r, TRNSYS, IES VE, IDA ICE, e EnergyPlus (BEHRENDT *et al.*, 2011).

De acordo com Hassan e Abdelaziz (2020), os projetistas podem determinar as possibilidades de redução de componentes do sistema, deslocamento de cargas usando massa térmica para reduzir contas de eletricidade ou combinar sistemas de resfriamento radiante com medidas passivas, como ventilação natural ou mecanismos de sombreamento por meio da simulação. As simulações também são essenciais para definir uma estratégia de controle confiável com consumo de energia conservador.

Diversos estudos estão sendo realizados sobre métodos de análise do desempenho energético de sistemas de piso radiante hidráulico. O ponto de partida da análise de energia é a identificação do mecanismo de transferência de calor. Alguns estudos analisaram o mecanismo de transferência de calor através de algumas soluções, como simulação de energia, soluções analíticas e soluções numéricas, como o método de diferenças finitas ou método de volume finito (RHEE; OLESEN; KIM, 2017).

Laouadi (2004) desenvolveu um modelo de previsão bidimensional para sistemas radiantes. Esse modelo de previsão foi integrado em um *software* de simulação de energia que utiliza a modelagem numérica unidimensional. A vantagem do modelo bidimensional em relação ao modelo unidimensional é que ele prevê com precisão a temperatura da superfície de contato entre o concreto e a tubulação. Com o modelo bidimensional também é possível prever as temperaturas mínimas e máximas do piso, que são necessárias para evitar a condensação e melhorar o conforto térmico.

A fim de melhorar a técnica de controle convencional existente, Cho e Zaheer-Uddin (2003) propuseram uma estratégia de controle preditivo para gerar o número ideal de horas de aquecimento por dia. Essas horas de fornecimento de calor foram determinadas com base em uma previsão da temperatura externa. Nesse estudo foi comparado o desempenho do controle preditivo com o controle convencional. Para realizar o estudo, um modelo de piso radiante foi incorporado através do *software* TRNSYS, e algumas medições foram realizadas em uma câmara de teste experimental. Após as simulações, os resultados mostraram que o controle preditivo reduziu o consumo de energia em 20% em comparação com o controle convencional.

Rhee *et al.* (2010) realizaram simulações computacionais no *software* TRNSYS para investigar até que ponto o desempenho térmico de um sistema de aquecimento radiante pode ser melhorado pelo controle individual do ambiente em comparação com o controle central. Os resultados identificaram que com o controle central a sala

de estar demorava mais tempo para atingir a sua temperatura desejada (23°C), enquanto os demais ambientes ficavam superaquecidos a 26° C. Isso ocorre, pois, conforme mostra a Figura 11, a sala de estar possui maior carga de aquecimento, maior comprimento de tubo e a vazão de água fornecida na sala torna-se menor que a vazão projetada devido à maior resistência hidráulica. Já as simulações realizadas com o controle individual obtiveram uma redução de 8 a 9% no consumo de energia em comparação com o controle central, pois cada ambiente conseguiu receber uma vazão apropriada de acordo com a sua carga de aquecimento.

Figura 11 - Layout da tubulação do apartamento simulado



Fonte: Adaptado de Rhee *et al.* (2010).

Ansuini *et al.* (2011) desenvolveram um protótipo de piso radiante com uma camada de material de mudança de fase (PCM) integrada. Para a realização do estudo foram construídas amostras no laboratório e desenvolvidos modelos de elementos finitos. Em resumo, para o resfriamento de um quarto de 16 m², o piso com um material de mudança de fase economizou cerca de 25% da água utilizada para o resfriamento. No entanto, para fins de aquecimento, a camada com material de mudança de fase não afetou o comportamento do aquecimento.

Zarrella, De Carli e Peretti (2014) analisaram alguns sistemas de resfriamento radiante tipicamente utilizados em edifícios da Itália. Para a realização do estudo, um apartamento localizado na Itália foi simulado através do modelo digiThon. O sistema radiante foi equipado com termostatos individuais que possuem um controle “on-off”

para regular a temperatura do ar interno. Quando a temperatura do ar interno atingia 20 °C, o sistema começava a aquecer, e quando a temperatura chegava aos 27 °C o sistema resfriava. Foram realizadas algumas hipóteses de simulações de resfriamento radiante, como: resfriamento com e sem desumidificador; resfriamento com ventiladores; e resfriamento com ventilação mecânica e desumidificador. Em relação a qualidade do ar, esse estudo constatou que os desumidificadores tiveram um desempenho menos eficaz quando comparados aos sistemas de ventilação mecânica. O estudo também concluiu que é importante utilizar a ventilação mecânica juntamente com o piso radiante em climas relativamente quentes e úmidos, porém, com desumidificação do ar, uma vez que possibilita melhores condições de conforto e qualidade do ar interno.

Bojic, Cvetovic e Bojic (2015) analisaram o desempenho do aquecimento radiante com três fontes de calor diferentes: caldeira a gás natural, bombas de calor de fonte subterrânea e bombas de calor de fonte subterrânea com painéis fotovoltaicos. Foram realizadas simulações no *software* EnergyPlus com a finalidade de comparar as emissões de CO₂, o consumo energético e o preço. O estudo mostrou que a caldeira a gás obteve menor emissão de CO₂ e menor consumo de energia primária em comparação com os demais sistemas. Todavia, a caldeira a gás obteve maior custo em comparação com os dois sistemas de bombas de calor de fonte subterrânea.

Alguns trabalhos envolvendo o sistema de pisos radiantes utilizaram a simulação de dinâmica de fluídos computacional (CFD) para melhorar o desempenho do sistema e investigar a capacidade térmica, o coeficiente de transferência de calor, o efeito do movimento do ar e a uniformidade térmica do ambiente (XIE *et al.*, 2016; RHEE; OLESEN; KIM, 2017).

Xie *et al.* (2016) utilizaram a simulação de dinâmica dos fluídos computacional (CFD) para obter a distribuição da temperatura da superfície e a sua capacidade de resfriamento. Para isso, eles realizaram um estudo sobre a transferência de calor do fluxo de água fria no painel de resfriamento. Foi analisada a influência da temperatura da água, velocidade, espaçamento entre os tubos e diâmetro dos tubos. Esse estudo mostrou que as condições da água de entrada possuem um efeito significativo no desempenho do resfriamento. A capacidade de resfriamento do painel aumentou com o acréscimo da temperatura da água de entrada. Além da temperatura, a velocidade da água e o diâmetro dos tubos também influenciaram na capacidade de resfriamento,

pois quanto maior a velocidade da água e o diâmetro dos tubos, maior a capacidade de resfriamento do painel. Com isso, a capacidade de resfriamento teve uma correlação negativa com o espaçamento entre os tubos.

Oubenmoh *et al.* (2018) também utilizaram a simulação de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). O estudo comparou o desempenho de três layouts de pisos radiantes hidráulicos, entre eles: serpentina, espiral de contra-fluxo e espiral modulada e concluiu que a configuração espiral modulada permite uma temperatura mais homogênea do piso, além de possuir uma perda de pressão inferior comparada com as demais configurações.

WANG *et al.* (2019) avaliaram a velocidade do ar em três diferentes métodos de aquecimento em um edifício residencial por meio de simulação. Foram estabelecidos três modelos físicos de aquecimento, dentre eles: radiador, ar condicionado e piso radiante. Esse estudo mostrou que a velocidade do ar no interior do modelo de piso radiante é muito menor do que os outros modelos, o que é um fator importante já que a sala do modelo com piso aquecido tende a gerar menos poeira e, conseqüentemente, mais higiênica.

3 METODOLOGIA

Esse trabalho é dividido em duas partes, sendo a primeira parte uma entrevista com empresas que trabalham com pisos radiantes hidráulicos no Estado do Rio Grande do Sul e a segunda parte do trabalho são simulações computacionais para verificar o desempenho do sistema do piso radiante com e sem isolamento térmico na parede em um clima brasileiro localizado na Zona Bioclimática 2.

3.1 ENTREVISTA COM EMPRESAS DE PISOS RADIANTES

A primeira parte da metodologia é uma pesquisa qualitativa, na qual foram entrevistadas empresas que trabalham com o sistema de piso radiante hidráulico. A finalidade dessa pesquisa é compreender como esse sistema está sendo inserido no estado do Rio Grande do Sul.

Além disso, com essa pesquisa foi possível conhecer melhor os materiais que compõe o sistema, os critérios utilizados nas escolhas dos espaçamentos entre os tubos, a forma de instalação do sistema, os cuidados necessários durante a execução e a fase de uso, a forma de controle, as temperaturas da água utilizada dentro da tubulação, a utilização de normas estrangeiras e entre outras informações relevantes.

Essa pesquisa ocorreu em seis etapas: (1) Identificação das empresas que trabalham com pisos radiantes hidráulicos; (2) Elaboração do roteiro das entrevistas; (3) Realização das entrevistas; (4) Transcrição das entrevistas gravadas; (5) Tratamento dos dados e análise dos resultados.

3.1.1 Identificação das Empresas de Pisos Radiantes Hidráulicos

Primeiramente, foram selecionadas cinco empresas de piso radiante hidráulico no Rio Grande do Sul. Essas empresas foram selecionadas através de buscas na internet, mais precisamente, no site de busca Google. A fim de encontrar as empresas foi utilizado os seguintes termos no Google: piso radiante hidráulico no Rio Grande do Sul; aquecimento de piso no RS.

Depois de selecionadas as primeiras empresas vinculadas com os sistemas de piso radiante, foi utilizada a amostragem não probabilística, amostra bola de neve (os indivíduos selecionados para serem estudados convidam novos participantes da sua rede de amigos e conhecidos) (BABBIE, 2017), para selecionar as outras empresas que poderiam fornecer informações sobre projetistas conhecidos, instaladores, fabricantes dos materiais e outras pessoas relacionadas a esse sistema. Essas

peças provavelmente não seriam encontradas sem as indicações iniciais. Logo, com essa segunda amostra foram identificadas mais duas empresas e alguns fornecedores de materiais.

3.1.2 Elaboração do Roteiro da Entrevista

Após a revisão bibliográfica, foi possível compreender quais as informações seriam necessárias para entender como o sistema de piso radiante hidráulico está sendo inserido no Rio Grande do Sul.

Dessa maneira, foi elaborado um roteiro para a realização das entrevistas. O roteiro foi composto por diversas perguntas, agrupadas em nove blocos: Caracterização da empresa; Caracterização do entrevistado; Projeto; Sistema de Aquecimento Central; Instalação; Controle; Normas; Materiais e Mão de obra, e Pós-venda. As perguntas realizadas encontram-se no Apêndice A.

3.1.3 Realização das Entrevistas

As entrevistas com as empresas foram agendadas por telefone e posteriormente foram realizadas de forma presencial. Essas entrevistas ocorreram entre novembro de 2019 e janeiro de 2020 e a sua duração foi de aproximadamente 1 a 2 horas.

As perguntas pré-estabelecidas no roteiro foram utilizadas para dar início às entrevistas. No entanto, essas entrevistas se caracterizam como entrevistas semiestruturadas, ou seja, apesar de ter um roteiro pré-estabelecido, os entrevistados estavam livres para explorarem outros aspectos que não haviam sido mencionados nas perguntas (BONI; QUARESMA, 2005).

As entrevistas foram gravadas em formato áudio e depois foram realizadas as suas transcrições para posterior análise.

3.1.4 Transcrição das Entrevistas Gravadas

A transcrição das entrevistas foi feita manualmente, sem a utilização de *softwares* de transcrição. Os áudios foram transcritos em documentos no Word para posteriormente serem analisados.

De acordo com Manzini (2008), o momento da transcrição representa uma pré-análise do material, pois no momento da entrevista o pesquisador necessita focalizar a sua atenção no processo de interação realizada por meio de perguntas, por meio da

interação verbal e interação social. Portanto, o pesquisador-entrevistador busca responder ao seu objetivo da pesquisa no ato de entrevistar. Enquanto no momento da transcrição, essa meta em manter a interação já não está mais presente, pois o pesquisador se distancia do papel de pesquisador-entrevistador e se coloca no papel de interpretador de dados.

3.1.5 Tratamento dos Dados e Análise dos Resultados

Para a realização do tratamento dos dados foram consideradas as perguntas abertas quantitativas e, simplesmente, as perguntas abertas, conforme definidas a seguir:

- Perguntas abertas quantitativas, com respostas de “sim” ou “não”, ou com números, como diâmetros, espaçamentos e altura de alguns dados foram colocados em uma tabela do Excel. Nesses casos, optou-se pela tabela no Excel para melhor visualização dos resultados e para facilitar a comparação entre as empresas.
- Perguntas abertas, nas quais não foram sugeridas respostas, e dependiam muito das palavras do entrevistado, não foram colocadas em planilhas, mas analisadas de forma individual.

Como esse estudo foi exploratório, não foram encontrados trabalhos semelhantes no estado do Rio Grande do Sul para comparação. Com isso, os resultados foram comparados com recomendações e limites de temperaturas estabelecidos em normas internacionais.

3.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO POR MEIO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Como as entrevistas realizadas anteriormente mostraram que apesar das empresas recomendarem o uso do isolamento térmico nas paredes, muitos clientes acabam não utilizando. Em virtude disso, optou-se por realizar simulações computacionais a fim de avaliar a influência do isolamento térmico em um ambiente aquecido e resfriado com piso radiante hidráulico. Portanto, a simulação vai tratar dos efeitos do isolamento térmico das paredes e do condicionamento térmico sobre o conforto térmico das pessoas inseridas na sala.

Para a elaboração dessa etapa foi necessário escolher um *software* adequado, caracterizar o clima de Passo Fundo/RS/Brasil, onde está inserido o estudo de caso, caracterizar o estudo de caso, apresentar os domínios computacionais e definir os parâmetros que foram avaliados.

3.2.1 Software de Simulação

Para a realização das simulações computacionais desse trabalho foi utilizado o *software* Esp-r. Esse *software* foi criado pela Universidade de Strathclyde e está em desenvolvimento a mais de 25 anos e tem como objetivo realizar simulações para verificar o desempenho térmico e energético das edificações (CRAWLEY *et al.*, 2008).

Para serem confiáveis, os *softwares* precisam de validações a fim de comprovar a sua eficácia. A validação de programas de simulação dinâmica de edifícios é uma tarefa complexa contínua e de longo prazo. Por isso, uma metodologia de validação bem estabelecida compreende elementos analíticos, comparação entre programas, validação empírica e um número significativo de testes.

O estudo de Strachan, Kokogiannakis e Macdonald (2008) apresentou diversos casos de validação do programa Esp-r. Dentre os estudos, alguns avaliaram as temperaturas máximas e mínimas, a previsão da distribuição da luz do dia, o desempenho de sistemas de resfriamento e aquecimento radiante, o fluxo de ar com medições em campo para comparação, o consumo de energia de sistemas de aquecimento e resfriamento e entre outros.

3.2.2 Dados Climáticos da Cidade de Passo Fundo

Através das entrevistas realizadas na primeira etapa desse trabalho, notou-se que nenhuma empresa de piso radiante hidráulico estava situada na cidade de Passo Fundo no período das entrevistas (novembro de 2019 e janeiro de 2020). Logo, optou-se por simular um modelo que tivesse inserido na cidade de Passo Fundo, pensando na possibilidade de abertura de mercado para venda de pisos radiantes hidráulicos, visto que a cidade tem um grande potencial para investimentos.

A cidade de Passo Fundo está situada na região norte do estado do Rio Grande do Sul, na latitude 28° 15' 40"S e longitude 52° 24' 30" O. A cidade de Passo Fundo possui 784,407 km² de área territorial, com uma população estimada de 204.722 pessoas (IBGE, 2020).

De acordo com a classificação *de Köppen*, Passo Fundo está localizado na Zona Climática fundamental temperada (C), apresentando clima do tipo fundamental úmido (f) e variedade específica subtropical (Cfa), com chuvas bem distribuídas durante o ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C (EMBRAPA, 2011).

Para Frandoloso *et al.* (2019), a cidade de Passo Fundo, localizada na Zona Bioclimática 2, possui verões quentes e invernos frios e úmidos, com uma grande amplitude térmica diária. Essa grande amplitude acaba impactando diretamente nas condições de conforto térmico do ambiente.

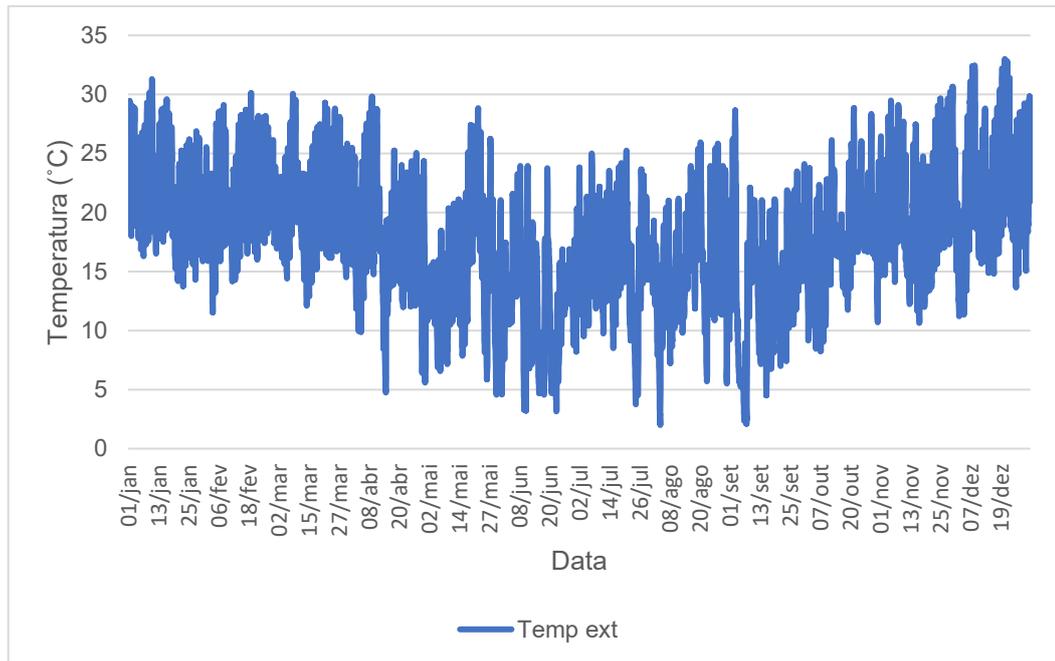
3.2.3 Arquivo Climático

O arquivo climático utilizado nas simulações desse trabalho foi elaborado por Roriz (2012), e é resultante de uma coleta de temperaturas retiradas de uma sequência de dados históricos de vários anos do INMET. Os dados estão registrados em 411 estações climatológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010. O método utilizado considerou que, para cada estação e cada mês, seria excluído, sucessivamente, os anos mais quentes e mais frios, até que restasse apenas um, considerado como o mês típico do lugar.

O Gráfico 1 apresenta a temperatura do ar da cidade de Passo Fundo durante um ano. Esses dados foram retirados do arquivo climático “EPW” elaborado por Roriz (2012). Esse arquivo climático pode ser utilizado para qualquer ano, visto que os dados apresentados por ele não são referentes a um ano somente, conforme explicado anteriormente.

Como pode-se observar no Gráfico 1, a cidade de Passo Fundo possui uma grande amplitude térmica, sendo que a mínima registrada durante o ano foi de 2 °C e a máxima de 33 °C. Cabe ressaltar que valores maiores que 33 °C para a máxima temperatura e valores menores que 2 °C para as mínimas temperaturas podem ser observadas durante o ano, isso porque a metodologia utilizada na construção do arquivo climático não visava os extremos, excluindo assim, os anos mais quentes e mais frios.

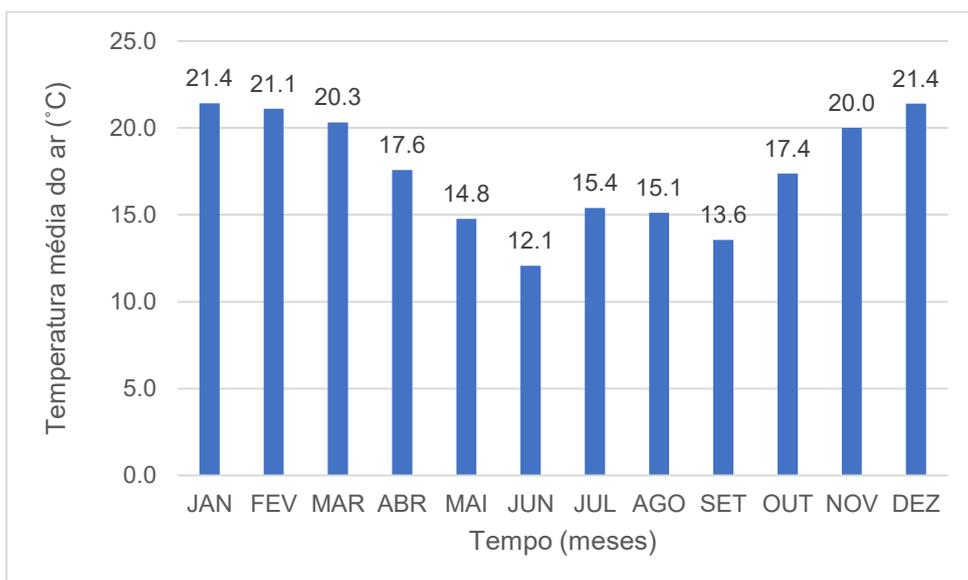
Gráfico 1 - Temperatura do ar na cidade de Passo Fundo



Fonte: Elaborado pela autora com base no arquivo climático em EPW (2020).

O Gráfico 2 apresenta a temperatura média do ar em relação a cada mês do ano. Esses valores médios de temperatura foram calculados a partir dos dados do arquivo climático. É possível visualizar que os meses com maior temperatura média do ar foram os meses de janeiro e dezembro, enquanto o mês de junho foi o que apresentou a menor temperatura média do ar.

Gráfico 2 - Temperatura média do ar de cada mês do ano



Fonte: Elaborado pela autora com base no arquivo climático em EPW (2020).

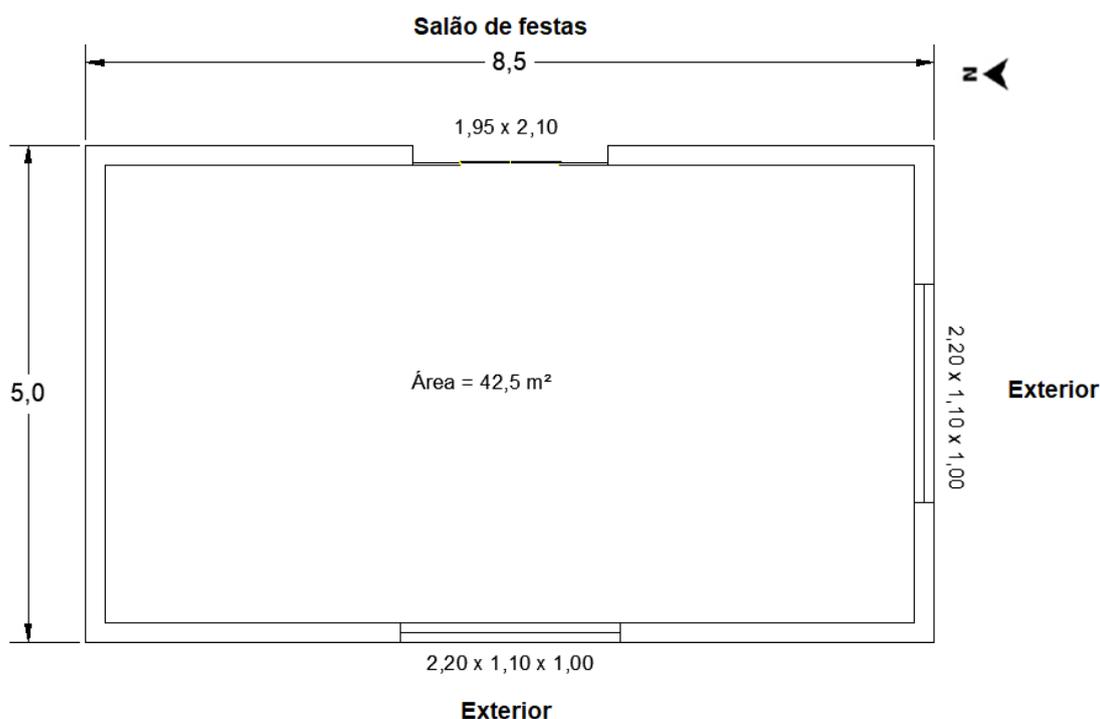
Desta forma, optou-se por simular os modelos em um dia típico de verão e um dia típico de inverno. Apesar dos meses de dezembro e janeiro apresentarem as mesmas temperaturas médias no Gráfico 2, os meses de dezembro e janeiro atingiram uma temperatura média de 21,41 °C e 21,42 °C, respectivamente. Logo, para o dia típico de verão foi escolhido o dia 1 de janeiro porque o mês de janeiro representou o mês mais quentes do ano, e para o dia típico de inverno optou-se pelo dia 21 de junho pelo fato de que foi o mês com menor temperatura média do ar.

3.2.4 Geometria da Sala

Para a escolha da sala de estar simulada foi necessário entrar em contato com uma das empresas entrevistadas, que relatou já ter executado um piso radiante hidráulico na cidade de Passo Fundo. A empresa encaminhou o projeto da residência para que o mesmo pudesse ser utilizado nesse trabalho. Com isso, optou-se por não alterar nenhuma das dimensões, posições das esquadrias e posição solar.

Essa sala possui geometria retangular (5x8,5 m), com uma área total de 42,5 m². Através da Figura 12 é possível visualizar a localização, as dimensões e a posição solar da porta e esquadrias.

Figura 12 - Planta baixa do modelo base simulado



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A residência em que está inserida essa sala possui dois pavimentos, sendo que a sala de estar está localizada no primeiro pavimento, que possui um pé direito de 2,70 m. Nota-se que essa sala possui duas janelas e uma porta. As janelas estão em posições solares diferentes, uma à oeste e a outra à sul. Contudo, as duas possuem as mesmas dimensões. Essas escolhas foram feitas de acordo com o projeto fornecido por uma das empresas entrevistadas.

A Figura 13 apresenta uma imagem 3D dos ambientes que compõe o primeiro pavimento da residência, incluindo a sala de estar simulada. Observa-se que a sala de estar simulada faz divisa com uma cozinha/salão de festas e também com o hall de entrada/sala. Acima dessa sala está situado um dos dormitórios da residência.

Figura 13 - Primeiro pavimento da residência



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.5 Modelos Simulados

Foram simulados oito modelos a fim de verificar a influência do isolamento térmico no ambiente com e sem a presença do condicionamento térmico. O condicionamento térmico, nesse caso, é o aquecimento ou o resfriamento do piso, dependendo da temperatura do ar no interior do ambiente.

Escolheu-se dois modelos de parede para que pudessem ser comparados ambientes com isolamento térmico na parede e sem o isolamento térmico na parede. As paredes sem isolamento térmico foram denominadas de P1 e as paredes com o isolamento térmico foram denominadas de P2. A descrição dos componentes das paredes estão descritas na Seção 3.2.6.

Nas paredes com isolamento térmico (P2) optou-se por utilizar o EPS, por ser um material facilmente encontrado e utilizado para fins de isolamento térmico. Além do mais, foram selecionadas três espessuras de isolamento térmico (25 mm, 50 mm e 75 mm) para avaliar o conforto térmico do ambiente com e sem condicionamento térmico à medida em que se aumentava a espessura do isolamento.

Todos os modelos simulados possuem a mesma configuração de piso, ou seja, o piso utilizado nas simulações possui as camadas necessárias para a execução do piso radiante hidráulico. Mesmo os modelos que não consideraram aquecimento e resfriamento no piso tinham a mesma configuração de piso.

Além do piso, o teto, porta e janelas também possuem a mesma configuração em todos os modelos simulados. Portanto, as paredes são os únicos elementos que possuem variação na configuração. Os modelos simulados foram nomeados por códigos. A descrição de cada código está apresentada na Tabela 3.

Como pode-se observar na Tabela 3, os modelos foram separados em SIP (sem isolamento térmico na parede) e CIP (com isolamento térmico na parede). Os modelos CIP variaram entre CIP25, CIP50 e CIP75. Essa nomenclatura dos modelos CIP se refere a espessura do EPS que está no interior da parede, ou seja, as espessuras variaram entre 25 mm, 50 mm e 75 mm.

Depois do código SIP ou CIP foi adicionado (+) o código do condicionamento térmico, que variou entre SC (sem condicionamento térmico) ou CC (com condicionamento térmico). Como esse trabalho está avaliando o aquecimento/resfriamento de piso, nos modelos CC foi considerado que a energia estava inserida na camada de argamassa do piso. No entanto, para identificar os momentos em que o aquecimento ou o resfriamento eram acionados foi criado um *set point* de temperatura. Nesse *set point* considerou-se que o aquecimento no piso era acionado em temperaturas inferiores a 20 °C e o resfriamento do piso era acionado quando essas temperaturas ultrapassavam os 26 °C.

Tabela 3 - Código e descrição dos modelos simulados

Código do modelo	Descrição
SIP + SC	Sem isolamento térmico na parede (P1) e sem condicionamento térmico
CIP25 + SC	Com isolamento térmico na parede (P2) de 25 mm e sem condicionamento térmico
CIP50 + SC	Com isolamento térmico na parede (P2) de 50 mm e sem condicionamento térmico
CIP75 + SC	Com isolamento térmico na parede de (P2) 75 mm e sem condicionamento térmico
SIP + CC	Sem isolamento térmico na parede (P1) e com condicionamento térmico
CIP25 + CC	Com isolamento térmico na parede (P2) de 25 mm e com condicionamento térmico
CIP50 + CC	Com isolamento térmico na parede (P2) de 50 mm e com condicionamento térmico
CIP75 + CC	Com isolamento térmico na parede (P2) de 75 mm e com condicionamento térmico

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.6 Materiais dos modelos

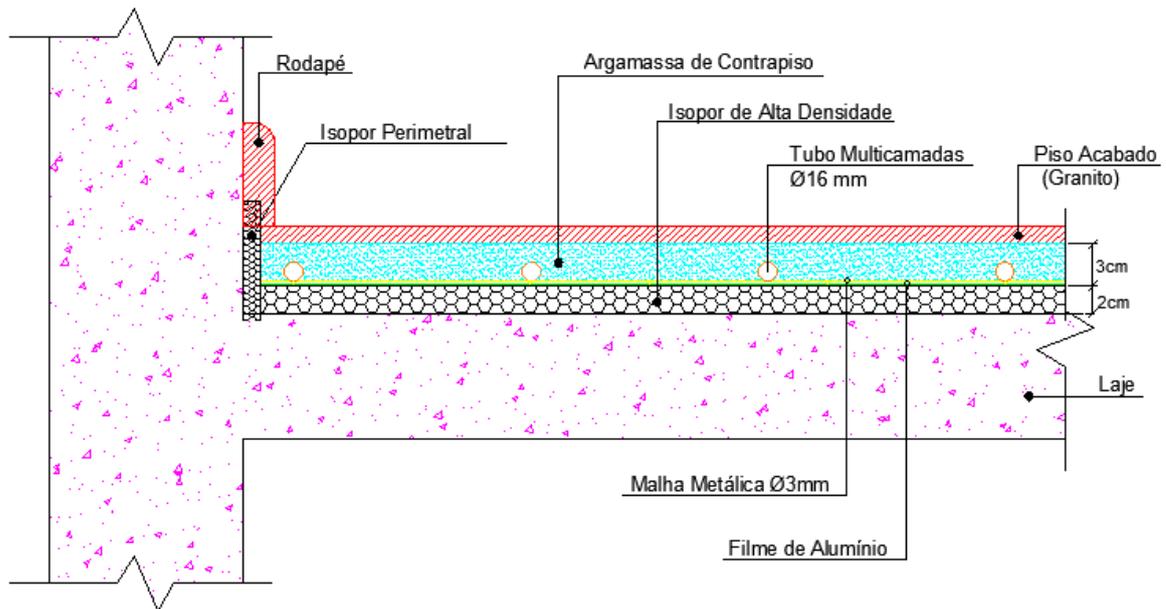
Como os materiais de construção possuem uma grande influência no desempenho térmico dos ambientes, é importante conhecer as suas propriedades físicas, uma vez que interferem diretamente no resultado das simulações.

As paredes do modelo de referência (P1) são em blocos cerâmicos furados, revestidos por 2 cm de reboco interno, 2 cm de reboco externo e assentadas com argamassa de assentamento de 1 cm de espessura.

Já as paredes dos modelos com isolamento térmico (P2) possuem os mesmos blocos cerâmicos furados descritos acima, porém, nessa configuração foi adicionado o EPS nas espessuras de 25 mm, 50 mm e 75 mm, dependendo do modelo, e por fim foi colocada uma camada de gesso acartonado de 13 mm.

O piso da residência tem as camadas necessárias para o funcionamento do piso radiante, como mostra a Figura 14. Esse piso foi modelado conforme a configuração utilizada por grande parte das empresas entrevistadas, apresentadas na Seção 4.1. Logo, o piso possui uma camada de concreto de 7 cm (Laje), uma camada de isolamento (EPS) de 2 cm, uma camada de argamassa de 3 cm, na qual a tubulação é instalada, e o revestimento final em granito com 2 cm de espessura.

Figura 14 - Corte do piso radiante utilizado na residência



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O teto é composto por tijolo maciço, argamassa comum e concreto, totalizando uma espessura de 12 cm. As esquadrias possuem vidros simples transparentes com 6 mm de espessura, e a porta interna é de madeira com 2,5 cm de espessura.

Na simulação foi considerado que as paredes em que estão localizadas as janelas estão com a face voltada para o exterior. Enquanto isso, as demais paredes foram consideradas “similar”, ou seja, possuem características semelhantes aos demais ambientes da casa. O teto da sala de estar também foi considerado “similar” por haver um outro pavimento acima. Já a parte inferior do piso radiante foi considerado como adiabático, ou seja, ele não possui troca de calor com as camadas abaixo do piso. Sendo assim, a energia de aquecimento e resfriamento não é dissipada às camadas do solo.

Como o *software* ESP-r cria um sistema construtivo através de camadas, foi necessário criar os materiais que representam as camadas para, posteriormente, criar os sistemas construtivos, que são a união dessas camadas de materiais. Para exemplificar, na construção de um sistema construtivo, como uma parede, é necessário adicionar algumas camadas, como por exemplo, a camada de bloco cerâmico, a camada de argamassa de assentamento e a camada de revestimento.

As propriedades térmicas das camadas estão inseridas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedade térmica dos materiais

Sistema	Camadas	Espessura (m)	Condutividade térmica W/(m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico kJ/(kg.K)
Parede 1 (P1)	Argamassa	0,02	1,150	1900	1000
	Bloco Furado	0,11	0,430	1085	610
	Argamassa	0,02	1,150	1900	1000
Parede 2 (P2)	Argamassa	0,02	1,150	1900	1000
	Bloco Furado	0,11	0,430	1085	610
	EPS	0,050	0,030	25	1000
	Gesso Acartonado	0,013	0,350	875	840
Piso Radiante	Terra argilosa	1,85	1,280	1460	879
	Concreto	0,07	1,750	2300	1000
	EPS	0,02	0,030	25	1000
	Argamassa	0,03	1,150	1900	1000
	Granito	0,02	3,000	2300	840
Janelas	Vidro	0,006	1,050	2500	750
Porta	Madeira	0,025	0,190	700	2390
Teto	Tijolo	0,010	0,900	1600	900
	Argamassa	0,005	1,150	1900	1000
	Concreto	0,120	1,750	2300	1000

Fonte: Esp-r (2021).

3.2.7 Domínios Computacionais

3.2.7.1 Ganhos de Calor

Os ganhos foram divididos de acordo com os dias, ou seja, dias úteis, sábados, domingos e feriados, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Ganhos de calor na sala de estar

Dia da Semana	Ganho por	Unidade	Período (horas)	Sensível (W)	Latente (W)	Radiação	Convecção
Dias úteis	pessoas	W	00:00 às 06:00			0,6	0,4
		W	06:00 às 08:00	40	40	0,6	0,4
		W	08:00 às 17:00	70	40	0,6	0,4
		W	17:00 às 21:00	360	200	0,6	0,4
		W	21:00 às 00:00	240	130	0,6	0,4
	iluminação	W/m ²	00:00 às 07:00	1		0,3	0,7
		W/m ²	07:00 às 09:00	8		0,3	0,7
		W/m ²	09:00 às 16:00	3		0,3	0,7
		W/m ²	16:00 às 21:00	8		0,3	0,7
		W/m ²	21:00 às 00:00	6		0,3	0,7
	equipamentos	W/m ²	00:00 às 06:00	2		0,4	0,6
		W/m ²	06:00 às 09:00	4		0,4	0,6
		W/m ²	09:00 às 18:00	2		0,4	0,6
		W/m ²	18:00 às 00:00	8		0,4	0,6
Sábado	pessoas	W	00:00 às 08:00			0,6	0,4

		W	08:00 às 09:00	140	100	0,6	0,4
		W	09:00 às 18:00	70	40	0,6	0,4
		W	18:00 às 21:00	300	200	0,6	0,4
		W	21:00 às 00:00	200	130	0,6	0,4
	iluminação	W/m ²	00:00 às 08:00	1		0,3	0,7
		W/m ²	08:00 às 10:00	8		0,3	0,7
		W/m ²	10:00 às 17:00	3		0,3	0,7
		W/m ²	17:00 às 21:00	8		0,3	0,7
		W/m ²	21:00 às 00:00	6		0,3	0,7
	equipamentos	W/m ²	00:00 às 06:00	2		0,4	0,6
		W/m ²	06:00 às 09:00	4		0,4	0,6
		W/m ²	09:00 às 18:00	2		0,4	0,6
		W/m ²	18:00 às 00:00	8		0,4	0,6
Domingo	pessoas	W	00:00 às 09:00			0,6	0,4
		W	09:00 às 10:00	180	100	0,6	0,4
		W	10:00 às 18:00	80	40	0,6	0,4
		W	18:00 às 21:00	200	100	0,6	0,4
		W	21:00 às 00:00	100	50	0,6	0,4
	iluminação	W/m ²	00:00 às 08:00	1		0,3	0,7
		W/m ²	08:00 às 10:00	7		0,3	0,7
		W/m ²	10:00 às 18:00	3		0,3	0,7
		W/m ²	18:00 às 21:00	8		0,3	0,7
		W/m ²	21:00 às 00:00	6		0,3	0,7
	equipamentos	W/m ²	00:00 às 06:00	2		0,4	0,6
		W/m ²	06:00 às 09:00	5		0,4	0,6
		W/m ²	09:00 às 18:00	3		0,4	0,6
		W/m ²	18:00 às 00:00	7		0,4	0,6
Feriados	pessoas	W	00:00 às 00:00			0,6	0,4
	iluminação	W/m ²	00:00 às 00:00	1		0,3	0,7

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os ganhos de calor representam a quantidade de calor sensível e latente que deve ser retirada ou colocada em um ambiente a fim de proporcionar condições de conforto desejadas. Os ganhos de calor adotados para a realização das simulações foram os recomendados pelo programa Esp-r para uma sala de estar.

Quanto à configuração do programa, ele considera no máximo três pessoas dentro da sala de estar, uma iluminação maior durante a noite, período em que as pessoas costumam estar em casa, e quanto aos equipamentos, ele considera televisão, rádio e entre outros não especificados.

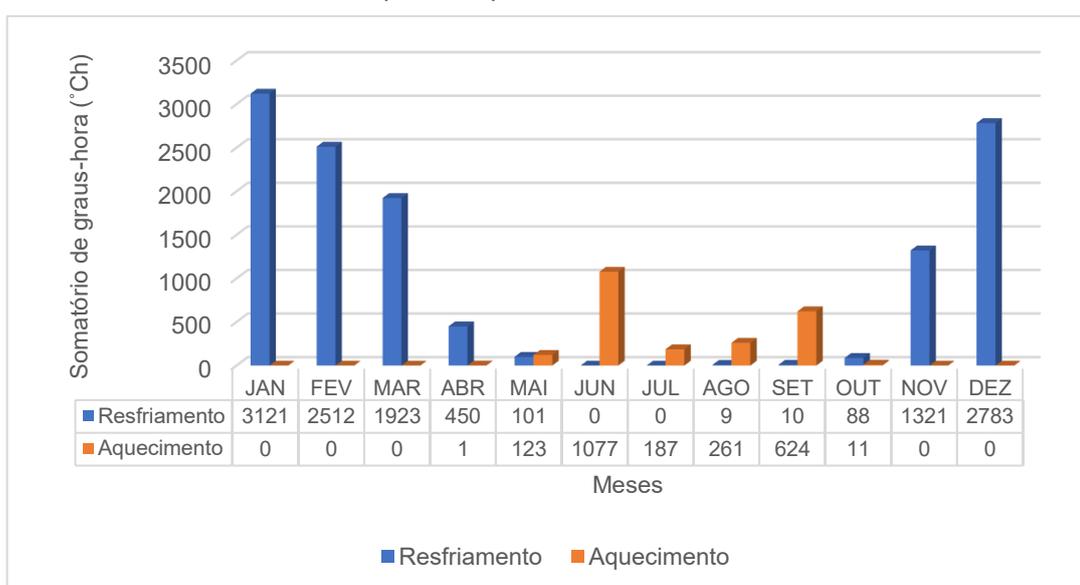
3.2.7.2 Capacidade Máxima e Automação do Sistema

Para iniciar a simulação adotou-se uma capacidade máxima de aquecimento e resfriamento de 4000 W, ou seja, 94,11 W/m². De acordo com Olesen (2008), a capacidade deve ficar em torno de 99 W/m² para o aquecimento e 42 W/m² para o resfriamento. No entanto, ele ressalta que a capacidade de resfriamento pode ultrapassar 100 W/m² se houver radiação solar direta no piso, como é o caso do modelo simulado nesse trabalho. Foi considerado que a energia era injetada no piso, mais precisamente na camada de argamassa, onde é inserida a tubulação nos sistemas executados no Brasil.

Também foi inserido um sistema de controle para que o aquecimento fosse acionado automaticamente quando a temperatura interna do ar chegasse em até 20 °C. Já o resfriamento do piso foi automatizado para ser acionado quando a temperatura ultrapassasse os 26 °C. Essa automação está programada para todos os dias do ano, incluindo domingos e feriados.

O Gráfico 3 apresenta o somatório em graus hora (°Ch) de resfriamento e aquecimento do modelo de referência (SIP + CC) para todos os meses do ano. Esses valores levam em consideração o *set point* programado com aquecimento de piso em temperaturas inferiores a 20 °C e resfriamento do piso quando essas temperaturas ultrapassam os 26 °C.

Gráfico 3 - Graus hora para o aquecimento e resfriamento durante um ano



Fonte: Elaborado pela autora a partir do arquivo climático em EPW (2021).

Nota-se, no Gráfico 3, que a necessidade de resfriamento desse ambiente é muito maior do que a necessidade de aquecimento. Também é possível observar que os meses de janeiro e fevereiro foram os meses com maior necessidade de resfriamento no ano, enquanto o mês de junho foi o mês com maior necessidade de aquecimento.

3.2.7.3 Sensores

O programa ESP-r necessita do uso de sensores para determinar temperaturas da superfície. Como esse trabalho tem como foco o uso do piso radiante hidráulico, o controle da temperatura da superfície do piso é essencial para garantir a saúde e segurança dos usuários.

Por isso, foi necessário adicionar um sensor de temperatura no piso radiante. O sensor foi colocado na última camada do piso, ou seja, na camada de granito, que representa o acabamento final do piso.

3.2.7.4 Limitações das Simulações

Esse trabalho não considerou as trocas de ar, a ventilação natural e as estratégias de sombreamento.

3.2.8 Parâmetros Avaliados

A fim de compreender a influência do isolamento térmico na parede em um ambiente sem e com a presença do resfriamento e aquecimento de piso, foi necessário avaliar alguns parâmetros de conforto térmico nas simulações, tais como: temperatura do ar na sala e radiação solar, temperatura da superfície do piso, temperatura radiante e fluxo de calor, PMV (*Predicted Mean Vote*) e o gasto de energia.

3.2.8.1 Temperatura do ar

É a temperatura do ar ao redor do corpo humano, expressa em °C. Essa temperatura está diretamente ligada às trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente ao redor. Para Lamberts *et al.* (2005), a temperatura do ar, também chamada de temperatura de bulbo seco, é a principal variável do conforto térmico,

pois para determinar a transferência de calor por convecção entre um indivíduo e o ambiente em que se está inserido é necessário conhecer a temperatura do ar.

Como nesse estudo foi realizada a análise de conforto térmico no ambiente com e sem o condicionamento térmico, é importante avaliar a variação na temperatura do ar e correlaciona-la com a radiação solar. Como esse modelo não possui proteção solar nas esquadrias, ou seja, ele não tem venezianas ou persianas, a radiação solar tende a incidir diretamente sobre as duas esquadrias de vidro. Então, é importante avaliar a radiação solar porque ela tende a elevar as temperaturas internas do ar no ambiente tanto no verão, quanto no inverno.

A radiação solar foi analisada em um dia típico de verão e um dia típico de inverno a fim de avaliar a sua influência nos modelos simuladas. De acordo com Huang e Zhai (2020), a incidência solar em um ambiente interno tem impactos significativos no conforto térmico, por isso a importância de analisa-la, uma vez que, ela pode contribuir para um aquecimento solar passivo favorável ou pode resultar em superaquecimento indesejado, até mesmo no inverno.

Esse trabalho considerou que as temperaturas “ideais” deveriam estar entre 20 °C e 26 °C, ou seja, com essas temperaturas não é necessário utilizar o aquecimento e o resfriamento no piso, uma vez que o *set point* foi programado dessa maneira.

3.2.8.2 Temperatura da superfície do piso

É definida como a temperatura de uma determinada superfície. Com essa temperatura é possível entender o efeito do contato direto entre o corpo e uma dada superfície. Como os pés, geralmente, estão em contato direto com o piso aquecido ou resfriado, é importante verificar a temperatura dessa superfície para não prejudicar a saúde dos usuários.

As temperaturas da superfície encontradas nesse trabalho foram comparadas com a norma ASHRAE (2016) e a EN 15377-1 (2008). A ASHRAE (2016) recomenda que a temperatura da superfície do piso resfriado deve estar acima de 19 °C para que os usuários se sintam confortáveis. Já a EN 15377-1 (2008) recomenda que a temperatura da superfície de resfriamento seja maior ou igual à 20°C quando os usuários são sedentários e maior ou igual à 18°C quando os usuários praticam algum tipo de atividade.

Em relação ao aquecimento, a ASHRAE (2016) recomenda que a temperatura da superfície do piso não ultrapasse 29°C para não causar queimadura nos pés dos usuários.

3.2.8.3 Temperatura radiante

De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), a temperatura radiante média é definida como a *“temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor do corpo humano por radiação é igual à troca de calor por radiação no ambiente real não uniforme”*.

Nessa seção a temperatura radiante foi correlacionada ao fluxo de calor dentro do ambiente. Segundo Specht *et al.* (2010), a análise do fluxo de calor e da quantidade de calor são dados importantes para compreender o desempenho térmico das composições avaliadas. Com isso, é possível ter um entendimento maior sobre os materiais que compõe os sistemas e minimizar os gastos de energia com refrigeração e aquecimento dos ambientes.

Nesse trabalho, com o fluxo de calor foi possível avaliar quais os modelos simulados possuem maior perda e ganho de energia e determinar se o isolamento térmico na parede impactou, de alguma maneira, esses ganhos e perdas. Por isso, foi feita a análise do fluxo de calor e da temperatura radiante em todos os modelos simulados.

3.2.8.4 PMV

Fanger (1970) realizou diversos experimentos na Dinamarca sobre conforto térmico e propôs uma escala sensorial de sete pontos com a finalidade de compreender e traduzir as sensações térmicas em relação ao ambiente. A escala é utilizada como resposta a perguntas referentes à forma em que o usuário classifica sua sensação térmica no momento.

A escala de sete pontos, utilizada nos estudos de Fanger está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Escala de sete pontos da sensação térmica

Sensação Térmica	Pontos
Muito frio	-3
Frio	-2
Levemente frio	-1

Neutro	0
Levemente quente	+1
Quente	+2
Muito quente	+3

Fonte: ASHRAE (2016).

Em análise a Tabela 6, nota-se que a escala de sete pontos varia de -3 a +3, sendo 0 como neutralidade térmica, valores positivos relacionados a sensações de calor e valores negativos relacionados a sensações de frio.

De acordo com a ISO 7730 (ISO, 2005) e a ASHRAE (2013), para calcular o PMV, ou seja, a sensação sentida pela pessoa, é necessário utilizar a “equação do PMV”, também chamada de “equação do voto médio estimado”, apresentada abaixo:

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036M} + 0.028) \cdot L$$

Onde:

PMV = Voto Médio Estimado;

M = Atividade Desempenhada pelo Indivíduo (W/m²);

L = Carga Térmica atuante sobre o corpo (W/m²).

Para o cálculo do PMV é necessário levar em consideração fatores pessoais e ambientais. Os fatores pessoais são as atividades desempenhadas (W/m²) e o isolamento térmico das roupas utilizadas (clo). Já os fatores ambientais estão relacionados ao “L” da fórmula, eles incluem as temperaturas do ar (°C), a velocidade do ar (m/s), a umidade relativa (%), a temperatura radiante média (°C) e a pressão parcial do vapor de água no ar ambiente (kPa) (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A norma ISO 7730 (ISO, 2005) especifica, através de tabelas, os valores referentes ao isolamento das roupas e as taxas metabólicas de acordo com a atividade desempenhada.

Nos modelos simulados nesse trabalho, por se tratarem de uma sala de estar, a taxa metabólica considerada foi de 1 met. De acordo com a classificação do anexo B da ISO 7730 (ISO, 2005), esse valor é referente à usuários que estejam sentados ou relaxados. A Tabela 7 apresenta algumas das atividades presentes no anexo B da ISO 7730 e as suas respectivas taxas metabólicas.

Tabela 7 - Taxa metabólica para diferentes atividades

Atividade	W/m²	met
Reclinado	46	0,8
Sentado/ Relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (escola)	70	1,2
Fazer compras	93	1,6
Trabalhos domésticos	116	2,0

Fonte: ISO 7730 (2005).

Em relação às vestimentas, foi considerado um nível de 0,7 clo (cueca, camisa, calça, meia e sapatos). Além disso, considerou-se que o ambiente estava sempre ocupado e com uma velocidade do ar de 0,1 m/s. A Tabela 8 apresenta algumas das vestimentas que a ISO 7730 (2005) traz como referência e os seus respectivos índices de resistência térmica (clo).

Tabela 8 - Índice de resistência térmica para vestimentas

Vestimenta	clo
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Camiseta	0,09
Camisa manga comprida	0,30
Calça flanela	0,28
Vestido leve	0,15
Meia grossa	0,05
Sapato	0,04

Fonte: ISO 7730 (2005).

A análise do PMV desse trabalho teve como objetivo entender quais os modelos simulados que obtiveram melhores condições de conforto térmico, ou seja, os modelos com PMV próximos à 0 (neutralidade térmica). Nesse caso, comparou-se o PMV dos modelos durante um dia típico de verão e durante um dia típico de inverno.

3.2.8.5 Gasto de energia

Devido ao crescente gasto de energia para manter os ambientes aquecidos ou resfriados, optou-se por realizar uma análise no consumo de energia dos modelos simulados durante um ano. Com essa análise foi possível observar quais os modelos que obtiveram maior consumo de energia e os que obtiveram maior economia de energia. Além do mais, foi verificado se houve uma demanda maior de aquecimento ou de resfriamento nos modelos com condicionamento térmico.

Nessa seção também foi comparado o gasto energético desse ambiente com o gasto energético de “*Passives Houses*”, que se refere a um padrão de construção de baixo consumo de energia, desenvolvido em 1988, na Alemanha, por Bo Adamson e Wolfgang Feist. A certificação é conferida às edificações que mantêm um consumo mínimo de energia durante o ano inteiro sem perder o conforto térmico (DALBEM *et al.*, 2017).

De acordo com Dalbem *et al.* (2017), existem alguns critérios para que um projeto possa receber a certificação. Nesse trabalho, foi avaliado somente a demanda de energia recomendada para esse tipo de construção. Logo, a demanda de energia para aquecimento e arrefecimento não deve ser superior a 15 kWh/(m².a).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENTREVISTAS COM AS EMPRESAS

4.1.1 Caracterização das Empresas

Todas as empresas encontradas estão situadas no estado do Rio Grande do Sul e foram caracterizadas quanto a sua cidade de origem, ano de fundação, número de funcionários, quantidade de pisos já instalados, local de maior atuação e produtos vendidos pela empresa.

Por questões éticas, o nome das empresas não foram divulgados, por isso foram nomeadas como A, B, C, D, E, F e G, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização das empresas

Empresa	Cidade	Ano de fundação	Nº de funcionários	Quantidade de pisos instalados	Local de maior atuação
A	Flores da Cunha	2011	7	40	Vacaria, Gramado
B	Caxias do Sul	1999	15	30	Caxias do Sul
C	Caxias do Sul	2013	5	30	Oeste do Estado
D	Bento Gonçalves	2004	26	150	Serra Gaúcha
E	Bento Gonçalves	1980	100	2000	Gramado
F	Bento Gonçalves	2000	35	1000	Serra Gaúcha
G	Gramado	2009	12	200	Região Metropolitana

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se que as empresas entrevistadas estão localizadas na região mais fria do RS (Serra Gaúcha). Essas empresas elencaram os locais com maior instalação de pisos aquecidos. Dentre as cidades com maior atuação, 85,71% das empresas citaram a Região das Hortênsias, que compreende as cidades de Caxias do Sul, São Francisco de Paula, Gramado, Canela e Nova Petrópolis. Um dos possíveis motivos da atuação dessas empresas ser maior nessa região é pelo fato de que essa região é conhecida por ser o principal ponto turístico do estado do Rio Grande do Sul, isso por causa da procura por hotéis, pois muitos utilizam o sistema de aquecimento de piso para proporcionarem maior conforto aos seus clientes.

Em relação ao número de funcionário e ao ano de fundação, as empresas com maior número de funcionários, como a E e F, são as que possuem um maior número de pisos radiantes hidráulicos já instalados. Essas mesmas empresas estão entre as três mais antigas, o que pode ser uma explicação para terem um número de funcionários e obras já realizadas superior às demais, já que estão no mercado a mais tempo e possuem uma empresa consolidada. No entanto, a empresa B é uma exceção, pois é a segunda empresa mais antiga e possui um número inferior de obras já realizadas. Segundo o proprietário da empresa B, o piso radiante hidráulico foi introduzido na empresa há três anos atrás, o que explica esse número inferior de pisos já instalados em comparação com as demais empresas.

4.1.2 Caracterização dos Entrevistados

Os entrevistados foram caracterizados quanto ao gênero, cargo, idade e formação.

Quanto ao gênero, 100% dos entrevistados são do sexo masculino. Com esse dado é possível observar que as mulheres não possuem muito interesse em empreender nessa área de aquecimento de pisos. Além do mais, todos os entrevistados relataram que os instaladores desse sistema também são do sexo masculino.

Em relação à idade dos entrevistados, 35 anos a idade mínima relatada, enquanto a idade máxima foi de 52 anos.

Quanto ao cargo dos entrevistados, 57% dos entrevistados relataram ser proprietários de suas empresas, enquanto os demais declararam ser diretores administrativos e gerentes comerciais.

Mais da metade dos entrevistados (57%) possuíam ensino superior completo, somente um dos entrevistados tinha apenas o ensino médio completo. Os entrevistados que tinham o ensino superior completo eram formados em Administração, Marketing e Direito. Dos entrevistados com ensino superior incompleto, um estava cursando administração e o outro havia trancado o curso de engenharia mecânica.

Em relação aos proprietários entrevistados, somente um deles possuía ensino superior completo, onde o proprietário era formado em administração. Esses dados mostram que as pessoas que estão empreendendo/trabalhando nesse setor muitas vezes não possuem uma graduação ou um conhecimento mais técnico sobre o

assunto. Além disso, observou-se que nenhum dos entrevistados era formado em alguma área relacionada ao sistema de aquecimento, como engenharia mecânica, engenharia civil ou arquitetura. No entanto, todos relataram que possuíam parcerias com profissionais da área técnica para a realização dos projetos.

4.1.3 Dados relacionados ao Projeto

Todas as empresas entrevistadas trabalham somente com o sistema de aquecimento de piso. Por isso, observa-se que há uma predominância do sistema de aquecimento no estado, enquanto o sistema de resfriamento não é utilizado. No entanto, o Rio Grande do Sul é um estado que, além de possuir baixas temperaturas no inverno, possui altas temperaturas no verão, sendo um estado com grande potencial para a utilização do sistema de resfriamento de piso.

Em relação ao material e espessura do tubo, todas as empresas comentaram utilizar o mesmo material e espessura de tubo no sistema de piso radiante hidráulico. De acordo com os relatos, o tubo utilizado pelas empresas é denominado como “tubo multicamadas”, onde há uma camada de alumínio interna e duas camadas externas de PEX (polietileno reticulado), e sua espessura é de 16 mm. A Figura 15 apresenta as camadas que compõe o tubo utilizado no sistema (externa, intermediária, de junção e interna), e as suas respectivas funções.

Figura 15 - Camadas que compõe o tubo utilizado no sistema



Fonte: Adaptado da empresa B (2021).

Em relação ao comprimento máximo do tubo, os entrevistados relataram que o depende muito do fabricante. Em geral esses tubos são fornecidos em bobinas/rolos e sem a utilização de emendas. Foram citados quatro comprimentos de tubos, entre eles: 50 m, 100 m, 200 m e 500 m.

Todas as empresas utilizam um espaçamento entre os tubos que varia entre 15 cm a 20 cm. As empresas A e D relataram utilizar sempre o mesmo espaçamento, 15 e 20 cm, respectivamente. As demais empresas declararam que o espaçamento varia de acordo com algumas características da obra, como a posição solar das aberturas, a presença de isolamento térmico nas paredes, a altura do pé direito, a espessura das paredes internas e externas, o número de aberturas e o tipo de material de revestimento utilizado no piso.

Em geral, em obras com o pé direito duplo costuma-se utilizar um espaçamento entre os tubos de 15 cm, enquanto nas obras com o pé direito baixo utiliza-se um espaçamento de 20 cm, já que se tem uma área menor a ser aquecida. Além disso, em locais que possuem isolamento térmico nas paredes e aberturas é possível aumentar o espaçamento entre os tubos para 20 cm, visto que a presença o

isolamento térmico nas paredes faz com que se tenha uma menor perda de calor no ambiente.

Quanto à disposição dos tubos, os resultados variaram entre o formato serpentina e o formato caracol. Das empresas entrevistadas, 42,86% relataram que utilizam sempre o formato serpentina, enquanto 28,57% declarou que utiliza sempre o formato caracol, pois acreditam que a distribuição da temperatura ocorre de forma mais homogênea neste formato. O restante das empresas (28,57%) declarou que utilizam os dois formatos, e o critério de escolha depende do espaço disponível no ambiente. Segundo a Rehau (2017), o formato espiral, conhecido no Brasil como “caracol”, possui menos restrições em relação ao raio de curvatura, permitindo um espaçamento menor entre os tubos e distribuindo o calor de maneira mais uniforme que o formato em serpentina.

Quando um sistema de aquecimento de piso é projetado, deve-se levar em consideração que este ocupará um espaço no chão. Essa altura disponível deve ser considerada no projeto para que não ocorram interferências posteriores. De acordo com o relato das empresas, essa altura variou entre 5 a 10 cm. Essa variação na altura ocorre devido à espessura do material de isolamento e à altura de argamassa colocada sobre a tubulação, uma vez que nem todas as empresas utilizam o mesmo material de isolamento e a mesma altura de argamassa.

As empresas entrevistadas citaram dois materiais utilizados como camada de isolamento do sistema de aquecimento de piso: a manta de polietileno aluminizado e o poliestireno expandido (EPS). Durante as entrevistas, observou-se que os entrevistados não tinham conhecimento sobre o nome técnico do material de isolamento, por isso era mencionado a “manta térmica” para a manta de polietileno, e o “isopor” para o poliestireno expandido.

Quanto ao poliestireno expandido, as empresas relataram utilizar um “isopor de alta densidade”, o que se diferencia de um “isopor comum”. De acordo com o relato da empresa B, o EPS utilizado no sistema possui “nódulos” e uma densidade de, aproximadamente, 30 kg/m³, conforme ilustra a Figura 16. Esses nódulos reduzem em até 30% o consumo de argamassa, além de facilitar a colocação dos tubos, visto que não é necessário o uso de ganchos para a fixação. Esses nódulos possuem um espaçamento fixo entre eles, o que reduz os erros relacionados à não uniformidade do espaçamento entre os tubos.

Figura 16 - “Isopor” de alta densidade com nódulos



Fonte: Própria autora (2021).

A espessura da manta de polietileno variou entre 2 a 50 mm. Contudo, não é usual a utilização de mantas com espessura de 50 mm, por isso acredita-se que o entrevistado tenha se confundido ao relatar tal espessura. Grande parte das empresas que utilizam a manta de polietileno como camada de isolamento declarou utilizar uma espessura de 2 mm. Em relação à espessura do poliestireno expandido, os resultados variaram entre 20 a 30 mm. Percebe-se que, em geral, as empresas utilizam sempre a mesma espessura de isolamento térmico, ou seja, não há uma variação dessa espessura de acordo com o projeto.

Para a elaboração do projeto de piso radiante, as empresas entrevistadas disseram utilizar o *software* Autocad. Somente a empresa G comentou que não utiliza nenhum *software*, pois acredita que o uso dos *softwares* gera um atraso na instalação. Quanto aos *softwares* de simulação, nenhuma das empresas relatou utilizar programas para simular o desempenho térmico e energético do sistema de aquecimento de piso. Durante as entrevistas, notou-se que as empresas não possuíam nenhum conhecimento sobre programas de simulação e “estranharam” a pergunta.

As empresas também foram questionadas se calculavam a carga térmica para o dimensionamento do sistema. Os resultados mostraram que 86% das empresas relataram calcular para a elaboração dos projetos. Contudo, percebeu-se que os entrevistados não tinham muito entendimento de como o cálculo era feito, por isso

essa parte da entrevista não foi prolongada. Em geral, as empresas que calculam a carga térmica disseram que esse cálculo é necessário para dimensionar a potência da caldeira. Para melhor entendimento, destacou-se o trecho da entrevista com a empresa B:

“É calculada a carga térmica levando em consideração a posição solar das paredes, por exemplo, se a parede externa estiver localizada a leste/sul, o espaçamento entre os tubos é menor (15cm), para passar mais água por m². Também é calculada uma potência por m², normalmente se faz o cálculo para gerar de 100 a 120 W/m². A soma dessa potência vai dimensionar a caldeira. O cálculo da carga térmica auxilia no dimensionamento.” (Empresa B)

Duas das empresas entrevistadas disseram encontrar dificuldades na elaboração dos projetos de pisos radiantes hidráulicos. A empresa A considerou uma dificuldade quando há muita tubulação passando pelo chão. Neste caso, é preciso aumentar a altura do contrapiso. No entanto, o aumento da altura do contrapiso faz com que a altura necessária para a instalação do piso se torne bem maior, o que acaba sendo uma das reclamações dos clientes. Já a empresa D considerou uma dificuldade quando os projetos arquitetônicos não são em formato dwg.

4.1.4 Dados Relacionados ao Sistema de Aquecimento Central

Todas as empresas relataram utilizar caldeiras para aquecer o piso radiante hidráulico. Porém, o que as diferencia é a fonte de abastecimento dessas caldeiras.

Nas entrevistas foram mencionadas caldeiras a diesel, gás, pellet, lenha e elétrica. Todas as empresas trabalham com, no mínimo, três fontes de abastecimento diferentes para que os usuários possam escolher a mais adequada de acordo com a necessidade. A Tabela 10 apresenta os tipos de caldeiras utilizadas por cada empresa.

Tabela 10 - Fonte de abastecimento das caldeiras

Empresas	Caldeiras				
	Diesel	Gás	Pellet	Lenha	Elétrica
A	X	X	X	X	
B	X	X	X	X	
C	X	X	X		
D	X	X	X	X	X
E	X	X	X	X	X
F	X	X	X	X	X
G	X	X	X	X	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

De acordo com os relatos, a escolha da caldeira depende muito do perfil do cliente. Por exemplo, na caldeira a lenha é necessário trocar a lenha com frequência, então é importante avaliar se o cliente tem essa disponibilidade de tempo. Além disso, também é importante avaliar o quanto o cliente está disposto a investir na escolha da caldeira, uma vez que há caldeiras mais caras de serem implementadas. Contudo, as caldeiras mais caras de serem implementadas possuem um consumo inferior, por isso a importância de levar em consideração o consumo a longo prazo.

A empresa A relatou que o pellet possui um consumo menor, mas o seu custo de implementação é maior. A empresa B disse que a caldeira a gás é a mais utilizada pelos clientes, enquanto as empresas D, E e G relataram que as caldeiras a diesel são as mais vendidas.

Quando as empresas foram questionadas em relação ao dimensionamento do sistema, percebeu-se que os entrevistados não tinham muita certeza de como o sistema era dimensionado e das equações que eram utilizadas. Portanto, nenhuma empresa soube dizer com precisão como o dimensionamento era realizado.

O relato da empresa D mostra um certo desconhecimento quanto aos métodos de dimensionamento utilizados por eles, visto que utilizam um *software* para dimensionar o sistema, conforme mostra o trecho abaixo:

“Não sei dizer precisamente como o sistema é calculado porque tem um programa que calcula. Esse programa é da própria empresa italiana que fabrica os materiais, mas sei que existe um delta de temperatura de 20 graus. Por exemplo, se fora do ambiente estiver 0 graus, posso ajustar para a minha temperatura interna ficar a 20 graus.”

A empresa G relatou que para o dimensionamento do sistema é utilizada uma faixa de 90 kcal/m², no entanto, o entrevistado não entrou em detalhes de como era realizado o cálculo.

Quanto à instalação do sistema, verificou-se que é realizada de maneira semelhante por grande parte das empresas. Uma das diferenças encontradas foi que algumas empresas instalam o sistema com uma camada de isolamento de polietileno e outras com uma camada de isolamento de poliestireno expandido.

Em geral, todas as empresas relataram que o primeiro passo para instalar o sistema de piso radiante é estar com a laje regularizada. Após isso, são colocadas as cintas perimetrais a as juntas de dilatação a cada dez metros. Essa cinta é colocada

entre o piso e a alvenaria, em todo o perímetro do ambiente a ser aquecido, para impedir a perda de calor pelas paredes, evitando as pontes térmicas. Depois é colocada a camada de isolamento sobre a laje regularizada. Essa camada de isolamento irá impedir a perda de calor pelo piso, por isso a importância de utilizá-la. Quando utilizado o poliestireno expandido com nódulos, como mostra a Figura 17, não é necessário a utilização de ganchos para fixação dos tubos, pois os nódulos já têm essa função de fixar os tubos nas distâncias pré-determinadas.

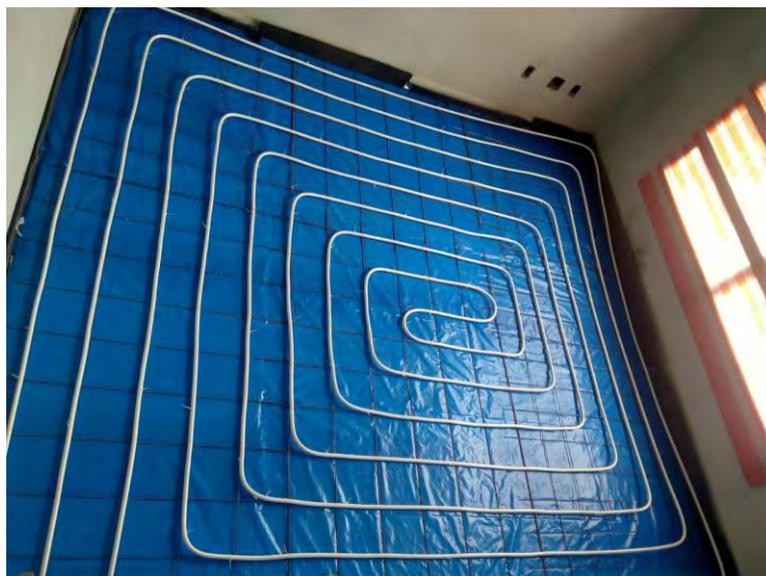
Figura 17 - Instalação de uma obra realizada pela empresa B



Fonte: Imagem fornecida pela empresa B (2021).

Porém, se for utilizada a manta de polietileno como camada de isolamento é necessário colocar primeiro a camada de isolamento e depois a malha de aço para que os tubos sejam fixados na malha e não fiquem soltos, evitando a perda de desempenho do sistema, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Instalação realizada pela empresa E



Fonte: Imagem fornecida pela empresa E (2021).

Após a colocação da camada de isolamento, são fixados os tubos em PEX. Esses tubos, geralmente, são fixados em formato serpentina ou caracol para melhor distribuição da temperatura do ar. Por fim, quando utilizado o poliestireno expandido como camada de isolamento, é colocada a malha de aço para evitar as rachaduras no piso e depois a argamassa para a regularização do contrapiso.

Segundo o relato das empresas entrevistadas, o último passo na instalação é a colocação do revestimento do piso. Todas as empresas relataram que pode ser instalado qualquer tipo de revestimento de piso após a regularização do contrapiso. Todavia, existem alguns revestimentos que não são recomendados de serem instalados, pois podem reduzir a eficiência e o desempenho do sistema.

As empresas entrevistadas não recomendaram a utilização da madeira como revestimento sobre o piso aquecido. Como a madeira é um material isolante, o sistema acaba demorando mais a aquecer em comparação com outros materiais de revestimento que são bons condutores de calor, como o porcelanato ou mármore. Além do mais, a empresa B comentou que o piso pode acabar envergando com a madeira, uma vez que ela possui mais umidade. Já a empresa C relatou que o consumo de energia acaba sendo superior com a utilização de revestimentos isolantes. Por isso, todas as empresas recomendam utilizar pisos frios, como o porcelanato, mármore e granito.

Para melhor explicação, destacou-se um trecho relevante da empresa D:

“O piso aquecido funciona com qualquer revestimento, mas o menos recomendado é a madeira, pois com ela a dissipação do calor é mais lenta. Mas tem clientes que utilizam a madeira sobre o piso aquecido. Porém, o cliente que quer utilizar a madeira deve entrar em contato com o fabricante do revestimento para avaliar se ele fornece a garantia do piso. Esse processo é importante porque podem ocorrer patologias no piso e a empresa fabricante do revestimento pode colocar a culpa no piso aquecido.”

Algumas empresas (43%) declararam que os clientes costumam instalar o piso radiante hidráulico em conjunto com outros sistemas de aquecimento. Contudo, 57% das empresas relataram que os clientes que optam pelo aquecimento de piso não instalam nenhum outro sistema de aquecimento em conjunto.

As empresas C, D, E e F disseram que seus clientes não costumam utilizar outros sistemas de aquecimento em conjunto com o sistema de piso radiante, mas que utilizam sistemas de resfriamento, como o ar condicionado. Já as empresas que informaram que os clientes costumam instalar o aquecimento de piso com outros sistemas de condicionamento térmico, relataram que os sistemas mais utilizados em conjunto com os pisos são os radiadores, conforme mostra o relato a seguir:

“Tem casos em que o cliente opta por colocar piso radiante hidráulico e radiador, piso radiante hidráulico e lareira a lenha ou piso radiante hidráulico e ar condicionado. Normalmente o cliente utiliza dois sistemas de aquecimento quando ele quer ter um sistema que aqueça mais rápido em conjunto com o piso aquecido.” (Empresa A)

De acordo com a empresa B, há clientes que aproveitam a mesma caldeira que aquece o piso radiante hidráulico para aquecer os radiadores e toalheiros. Para eles, *“[...] todos esses trabalham complementando um ao outro.”*

Todas as empresas entrevistadas disseram que recomendam a utilização de isolamento térmico nas paredes e aberturas aos seus clientes. De acordo com Huang *et al.* (2020), esse isolamento térmico tem a finalidade de reduzir a demanda de resfriamento e aquecimento, reduzir o custo do investimento inicial e o consumo de energia do edifício durante todo o seu ciclo de vida.

Para a empresa D, *“[...] quanto mais isolado for o ambiente melhor. O sistema de aquecimento de piso será o mesmo, mas a diferença é que o cliente terá economias no combustível.”*

Segundo a empresa B, grande parte das residências que instalam o piso radiante são casas de alto padrão. Sendo assim, costumam investir em isolamento de paredes e aberturas, conforme mostra o relato a seguir:

“Normalmente as casas que colocam o aquecimento de piso já possuem paredes duplas, aberturas em PVC com vidro duplo e com fechamento para não entrar o ar frio. As casas isoladas aquecem mais rápido e mantém o ambiente aquecido por mais tempo.” (Empresa B)

Apesar de notar que todas as empresas recomendam o uso do isolamento térmico na parede, percebeu-se pelo relato dos entrevistados e pelas visitas realizadas em algumas obras que essa prática não é tão comum. Logo, muitas casas que instalam o sistema não possuem isolamento térmico na parede.

Das empresas entrevistadas, 43% disseram não encontrar dificuldades na execução do sistema de piso radiante hidráulico, enquanto 57% relataram ter dificuldades na execução do sistema. Dentre as dificuldades citadas destacam-se:

- Grande desnível na laje e tubulação passando pelo chão. Nesses casos, para que o sistema de piso radiante aqueça de forma uniforme é necessário que seja feito o nivelamento da laje. Caso contrário, é possível que fiquem bolsas de ar no interior da tubulação, dificultando o aquecimento. (Empresas C e D)
- Quando o ambiente a ser aquecido possui um projeto com muitos ângulos diferentes. Isso acaba dificultando tanto no projeto, quanto na instalação. (Empresa E)
- Quando não há planejamento e gestão na obra. Através do trecho a seguir é possível identificar de que forma a falta de planejamento prejudica na instalação do piso aquecido:

“A grande dificuldade é fazer o cronograma da obra se adaptar ao cronograma de instalação. Muitas vezes programamos para instalar o piso aquecido e quando chegamos na obra nos deparamos com vários trabalhadores circulando e fazendo outras instalações, o que atrapalha muito.” (Empresa G)

4.1.5 Dados Relacionados ao Controle

Todas as empresas entrevistadas relataram que o controle do sistema é feito através de termostatos produzidos em massa e instalados nas paredes. Esse controle da temperatura do ambiente pode ser feito tanto por meio de setorização, ou seja, cada zona com um termostato, ou pode ser feito através de uma central, onde todos os ambientes são controlados por somente um termostato.

Segundo a empresa B, o sistema de aquecimento de piso é controlado por termostatos analógicos, digitais ou on-off programados por Wi-Fi. A Figura 19 mostra os termostatos que são utilizados para controlar a temperatura do ambiente.

Figura 19 - Termostatos utilizados para controle da temperatura



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O primeiro termostato apresentado na Figura 19 é do tipo analógico, o segundo é digital, e o terceiro é um termostato que controla a temperatura através de aplicativos (Wi-Fi). A empresa F comentou que a altura de instalação do termostato deve ser entre 1,2 e 1,4 metros do piso. Para melhor entendimento do controle do sistema destacou-se um trecho relevante:

“A peça mais importante do sistema é o distribuidor, onde há o controle da vazão da água para cada circuito. Já a temperatura do ambiente pode ser controlada por zona ou por central através de termostatos. Um sistema de controle por zona é mais caro comparado a um sistema controlado por uma única central, já que cada ambiente deverá ter seu termostato individual. Apesar do investimento para instalação do controle setorizado ser mais alto, o seu consumo acaba sendo menor, pois você poderá aquecer somente o local que está ocupando. No controle central seria necessário aquecer todos os ambientes, mesmo não os ocupando” (Empresa G)

De acordo com Athienitis (1997), a instalação inadequada de um sensor que mede a temperatura pode levar a condições de superaquecimento local, especialmente quando o revestimento do piso e a radiação solar afetam a distribuição de temperatura no ambiente.

Um dos avanços tecnológicos em relação a utilização dos termostatos é a possibilidade de utilizar uma interface de controle para o usuário. Essa interface de controle é utilizada através de um aplicativo no celular. Entretanto, para que isso ocorra é necessário ter um termostato especial (programado por Wi-Fi).

Uma das vantagens de utilizar o aplicativo no celular é a programação do sistema. O aplicativo permite que o usuário controle a hora em que deseja ligar e desligar o sistema, como relata o depoimento da empresa G:

“O aplicativo no celular facilita muito a vida dos usuários porque a pessoa pode controlar a temperatura de aquecimento do seu piso de qualquer lugar. Ela pode programá-lo para quando chegar em casa o sistema já estar aquecido, sem precisar esperar o tempo de aquecimento.” (Empresa G)

A empresa G também relatou que uma das grandes utilizações dos termostatos programados por aplicativos é na cidade de Gramado/RS, que por ser uma cidade turística, há muitas pessoas que possuem casas para passar os finais de semana. Sendo assim, muitas utilizam o aplicativo para aquecerem suas residências antes de saírem de suas cidades. Logo, o ambiente já está aquecido quando chegam em Gramado.

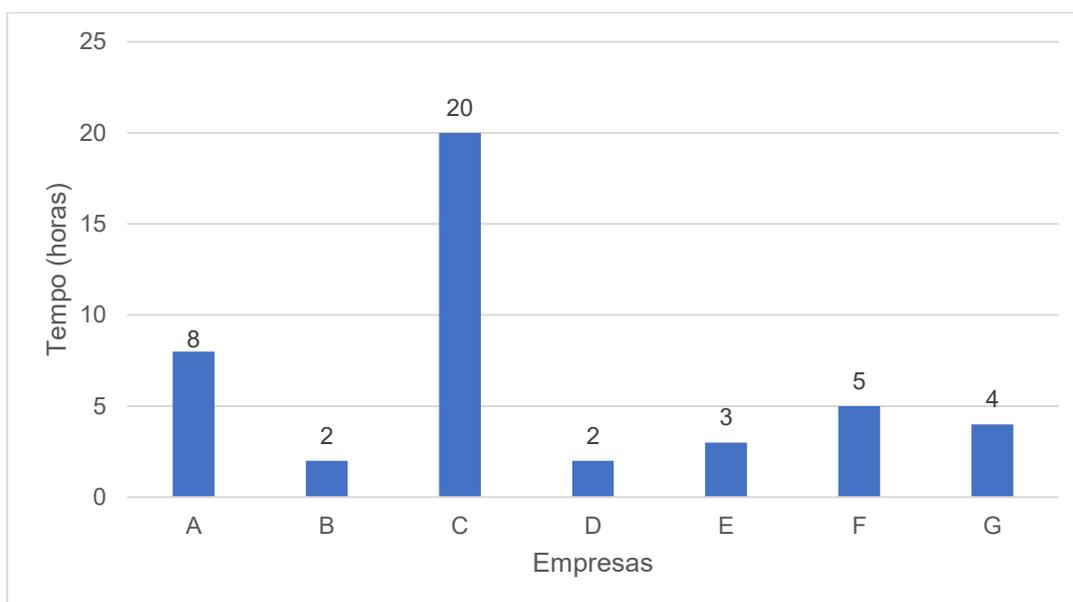
Um dos principais parâmetros que devem ser controlados para um bom desempenho do sistema é a temperatura da água que circula nos tubos. De acordo com as entrevistas, a temperatura da água não variou muito entre as empresas, ficando entre 35 °C e 50 °C, sendo que a temperatura mais mencionada foi de 45 °C. As empresas C e E responderam que utilizam a temperatura da água em um intervalo entre 35 °C a 40 °C e 40 °C a 45 °C, respectivamente. As empresas A, B, D e F afirmaram usar 45 °C para a temperatura da água. Já a empresa G utiliza 50 °C para a temperatura da água.

Em comparação com o manual da ASHRAE (2016), a temperatura da água utilizada pelas empresas estaria acima do limite recomendado pelo manual, visto que o manual recomenda uma temperatura em torno de 32,2 °C. Contudo, comparando com a EN 1264-3 (EN, 2009b), que recomenda uma temperatura máxima de 45 °C, as empresas estariam dentro do limite, exceto a empresa G que disse utilizar uma temperatura de 50 °C.

Lembrando que, quanto maior a temperatura da água, mais aquecido fica o ambiente, e conseqüentemente, maior o consumo de energia. Contudo, a água aquecida numa temperatura muito alta pode trazer riscos à saúde dos usuários, visto que, geralmente os pés estão em contato direto com o piso, podendo causar queimaduras ou outros problemas de saúde. Ademais, o consumo de energia acaba sendo superior com a água em uma temperatura muito elevada.

Outra questão analisada foi o tempo de aquecimento do sistema. O Gráfico 4 ilustra o tempo de aquecimento do sistema de acordo com o relato de cada uma das empresas. Algumas empresas responderam um intervalo de tempo para o aquecimento do sistema, ou seja, não foi relatado um valor exato. Nestes casos, considerou-se a pior hipótese para a elaboração do Gráfico 4, ou seja, os maiores tempos.

Gráfico 4 - Tempo de aquecimento de acordo com cada empresa



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Conforme mostra o Gráfico 4, o tempo de aquecimento do sistema variou entre 2 a 20 horas. Essa variação é grande, já que os materiais e a temperatura da água utilizada no sistema não se diferem muito. Logo, percebe-se que esse sistema, apesar de ser semelhante, possui variáveis que se diferem de maneira expressiva. Essas variáveis interferem diretamente no desempenho do sistema e na satisfação dos usuários. Contudo, o tempo de aquecimento relatado pela empresa C está muito distante das demais empresas, visto que o material de isolamento térmico utilizado é o mesmo utilizado pelas empresas B e E. Além disso, as empresas B e E também utilizam a mesma variação de espaçamento entre os tubos que a empresa C, ou seja, entre 15 a 20 cm. Todavia, a única diferença é que a empresa C utiliza uma temperatura da água entre 35 °C a 40 °C, enquanto as empresas B e E utilizam uma temperatura da água em torno de 45 °C. Logo, a temperatura da água mais amena,

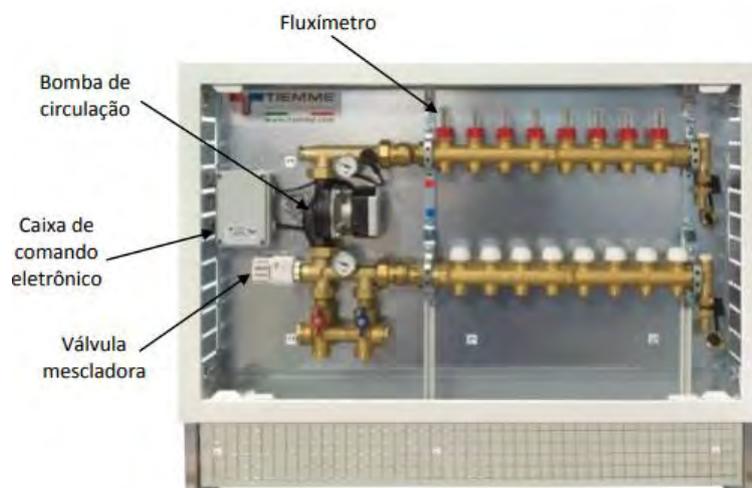
como relatada pela empresa C, pode ser um dos fatores que levaram a um tempo de aquecimento maior.

Nenhuma das empresas entrevistadas relatou encontrar dificuldades na implementação do controle do sistema de piso radiante hidráulico. Entretanto, uma das empresas fez um importante relato sobre a evolução da tecnologia, que permitiu a criação de novos termostatos.

“Hoje não temos dificuldades na implementação do controle, mas antigamente tínhamos, pois não existiam os termostatos por Wi-Fi, e então era necessário colocar uma fiação elétrica para sua instalação.” (Empresa D)

As empresas explicaram que o comando do piso radiante hidráulico pode ser verificado através da caixa de distribuição. A Figura 20 ilustra os componentes da caixa de distribuição do sistema.

Figura 20 - Detalhamento da caixa de distribuição utilizada pela empresa B



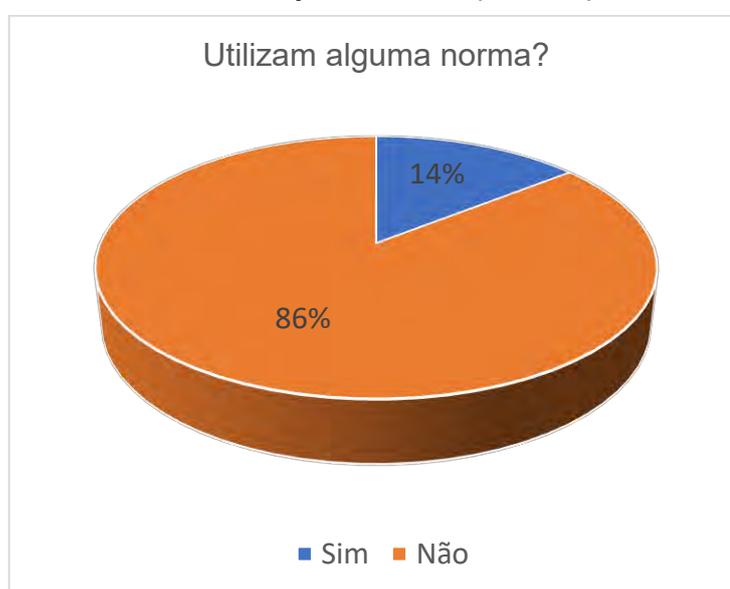
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Como pode-se notar na Figura 20, a caixa é composta pelo fluxímetro, que controla a vazão do circuito; uma válvula mescladora, que mistura a água para que a temperatura não exceda o recomendado; e a bomba de circulação.

4.1.6 Dados Relacionados às Normas

Conforme ilustra o Gráfico 5, a maior parte das empresas que trabalham com o sistema de piso radiante hidráulico não utilizam nenhuma norma para a elaboração do projeto, instalação e implementação do controle.

Gráfico 5 - Utilização de normas pelas empresas



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A empresa B foi a única empresa que afirmou levar em consideração as recomendações da norma europeia EN 1264 para elaboração do projeto, instalação e controle do sistema. No entanto, a empresa não soube dizer como ela é aplicada porque seu projetista estava viajando na data da entrevista. Segundo a empresa, “[...] cada material segue a sua norma de acordo com o país onde é fabricado. O isopor segue uma norma, o tubo segue outra norma, a caldeira outra norma.”

Além disso, todas as empresas foram questionadas se conheciam ou não a norma europeia EN 1264, manual da REHAU e manual da ASHRAE. Entretanto, somente a empresa B conhecia a EN 1264, enquanto as demais não tinham nenhum conhecimento sobre as normas e manuais mencionados.

Logo, nota-se que a falta de uma normativa brasileira faz com que as empresas não tenham um padrão ou parâmetro a seguir para elaboração dos seus projetos, dimensionamento, instalação e cuidados pós instalação. Por isso, não se tem uma garantia em relação a segurança e eficiência dos pisos instalados no estado do RS, uma vez que não há uma norma que regulamente esse sistema no país.

Por isso, as empresas foram questionadas quanto a importância da existência de uma norma brasileira para os pisos radiantes hidráulicos. Os resultados dessa análise ficaram bem divididos, pois 57% das empresas consideraram importante a existência de uma norma brasileira para esse sistema, enquanto 43% consideraram desnecessário.

As empresas, que consideraram importante a existência de uma norma brasileira, disseram que com a padronização todas as empresas seguiriam um critério de qualidade e instalação. O fragmento do discurso da empresa G serve como sustentação dos resultados apresentados:

“Seria importante, pois tiraria do mercado diversos profissionais que fazem de qualquer jeito, sem isolamento, sem setorização, sem as cintas perimetrais. Uma norma auxiliaria os profissionais que trabalham de maneira correta.”

Para a empresa C, uma norma não faz muita diferença e nem tem muita importância, pois *“[...] são poucos estados que utilizam esse sistema, só RS, SC, PR e parte de SP.”*

A empresa E considerou que uma norma para esse sistema não é importante devido ao aumento de fiscalização que essa norma causaria. Enquanto isso, a empresa F relatou o seguinte: *“Depende o quanto ela pode atrapalhar ou ajudar. Nós temos menos normas que na Europa, mas eu acho que aqui não seria relevante.”*

O fato de 43% das empresas considerarem desnecessário a implantação de uma norma brasileira para o sistema de piso radiante mostra um cenário preocupante. As normas são uma forma de auxiliar as empresas a projetarem e executarem o sistema de uma maneira segura e eficiente. Entretanto, percebe-se que a maior preocupação de algumas empresas está na venda e não na qualidade dos seus produtos.

4.1.7 Dados Relacionados aos Materiais e Mão de Obra

As empresas foram questionadas quanto aos critérios utilizados para a seleção da mão de obra que instalará o sistema, à existência de treinamento aos funcionários, às dificuldades encontradas na seleção da mão de obra e à disponibilidade dos materiais utilizados no sistema.

A diferença entre a quantidade de empresas que utilizam algum critério para a seleção da mão de obra e as que não utilizam nenhum critério é bem pequena. Cerca de 57% das empresas declararam não utilizar nenhum critério na seleção de seus funcionários, enquanto 43% informou que possui pelo menos um critério.

As empresas A, C e G citaram alguns dos critérios levados em consideração na escolha da mão de obra, como por exemplo:

- Profissionais com experiência na instalação de pisos radiantes ou que sejam encanadores;
- Profissionais que possuam boas referências;
- Profissionais caprichosos.

O grande diferencial é que todas as empresas entrevistadas relataram que os seus funcionários recebem treinamento interno para garantir um padrão de qualidade em todas as obras. No entanto, a empresa G destacou que o treinamento é muito importante, mas que os funcionários acabam aprendendo muito mais na prática, executando o sistema e tendo o auxílio de outros profissionais mais experientes.

Quanto aos materiais, 71% das empresas consideraram que os materiais utilizados no sistema não são facilmente encontrados na região. De acordo com o relato dessas empresas, todos os materiais são importados de outros países. Contudo, 29% das empresas discordaram e relataram que os materiais são facilmente encontrados porque, apesar de serem importados, há representantes desses materiais no Brasil.

Na Tabela 11 é possível verificar qual o local de importação dos materiais de cada empresa. Observou-se que todas as empresas citaram a Itália como um país de importação. Nas entrevistas também se verificou que grande parte dos materiais são importados da mesma empresa italiana.

Tabela 11 - Local de importação dos materiais

Empresa	Local de importação
A	Itália
B	Itália
C	Itália
D	Itália e China
E	Itália e China
F	Itália
G	Itália e Espanha

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Das empresas entrevistadas, 86% afirmaram encontrar dificuldades na seleção da mão de obra. De acordo com a empresa B, é difícil encontrar pessoas qualificadas, que possuam um curso técnico ou uma escolaridade maior. Já as empresas C e E destacaram que muitos profissionais já possuem seus “vícios” e muitos não querem mais fazer esse serviço “braçal”. Somente a empresa G relatou que não vê dificuldades nessa seleção porque já tem a equipe formada a anos, porém acredita que se fosse contratar novos profissionais teria dificuldade nos dias de hoje.

4.1.8 Dados Relacionados ao Pós-venda

As empresas foram questionadas quanto às patologias comuns de ocorrer após a instalação do piso, às manutenções necessárias, aos maiores elogios e reclamações dos usuários.

Em relação às patologias, as empresas informaram algumas das patologias que são comuns de ocorrer caso o piso seja instalado de maneira incorreta. A Tabela 12 mostra os principais problemas que podem acontecer de acordo com o relato de cada uma das empresas.

Tabela 12 - Problemas comuns de ocorrer após a instalação do piso radiante

Empresa	Patologias que podem ocorrer após a instalação		
	Bolsas de ar	Rachaduras/ Trincas	Levantamento do piso
A	X	X	
B		X	
C			X
D		X	
E	X		
F	X		
G	X		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando a Tabela 12, percebe-se que as bolsas de ar e as rachaduras/trincas no piso são as principais intercorrências citadas pelos entrevistados. De acordo com os relatos, as rachaduras/trincas podem ocorrer se for utilizado um isolamento de baixa densidade, se não houver juntas de dilatação ou se a temperatura da água exceder o recomendado. Já o levantamento do piso pode ocorrer se o revestimento não for assentado com uma argamassa própria para alta temperatura (ACIII – Argamassa Colante Tipo III).

A empresa G comentou sobre os problemas que podem ocorrer no sistema e falou sobre a forma de identificá-los, como mostra o trecho a seguir:

“O maior problema do sistema são as bolhas de ar, que impedem a circulação da água, fazendo com que o sistema não aqueça. Esses problemas relacionados ao piso são facilmente encontrados com sensor infravermelho que detectam o calor.”

Quanto à manutenção, todas as empresas relataram que não é necessário realizar nenhuma manutenção no piso. Todavia, a manutenção deve ser realizada na geradora de água quente.

A empresa A considerou que a manutenção deve ser feita somente quando há a formação de bolsas de ar dentro da tubulação, impedindo o aquecimento do piso. Enquanto isso, as demais empresas recomendam que a manutenção seja realizada periodicamente. A periodicidade dessa manutenção deve levar em conta a frequência de utilização da caldeira, podendo ser de até 3 em 3 meses. Porém, é recomendado que essa manutenção seja realizada, no mínimo, uma vez por ano.

A Tabela 13 mostra a periodicidade das manutenções de acordo com a recomendação das empresas.

Tabela 13 - Periodicidade das manutenções

Empresa	Periodicidade das manutenções
A	Não há um período específico
B	1 vez ao ano
C	2 vezes ao ano
D	1 vez ao ano
E	1 vez ao ano
F	1 vez ao ano
G	1 vez ao ano

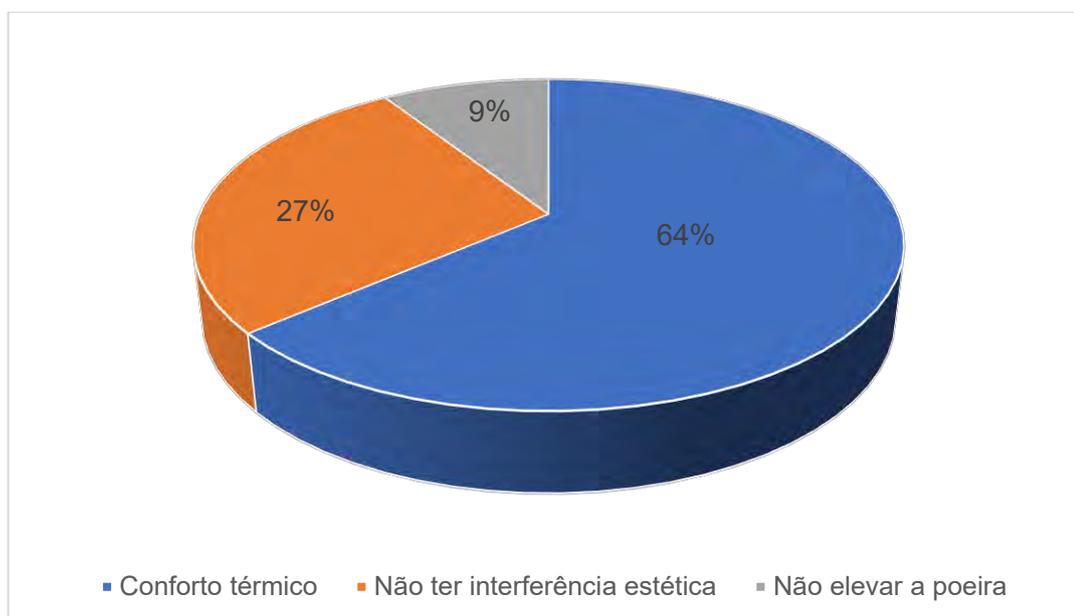
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Todas as empresas entrevistadas disseram que oferecem assistência aos seus clientes. Contudo, a empresa E relatou que se destaca porque oferece assistência 24 horas devido ao alto número de motéis e hotéis que necessitam de assistência em horários não comerciais.

Segundo o relato da empresa C, muitos problemas podem ser resolvidos por telefone, pois dependendo do problema que ocorre na caldeira é possível configurar pela central da empresa.

Quanto aos principais elogios dos usuários, as empresas citaram o conforto térmico, a interferência estética e a movimentação do ar. No Gráfico 6 é possível observar a porcentagem dos maiores elogios feitos pelos usuários em relação ao piso radiante hidráulico.

Gráfico 6 - Maiores elogios dos usuários



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

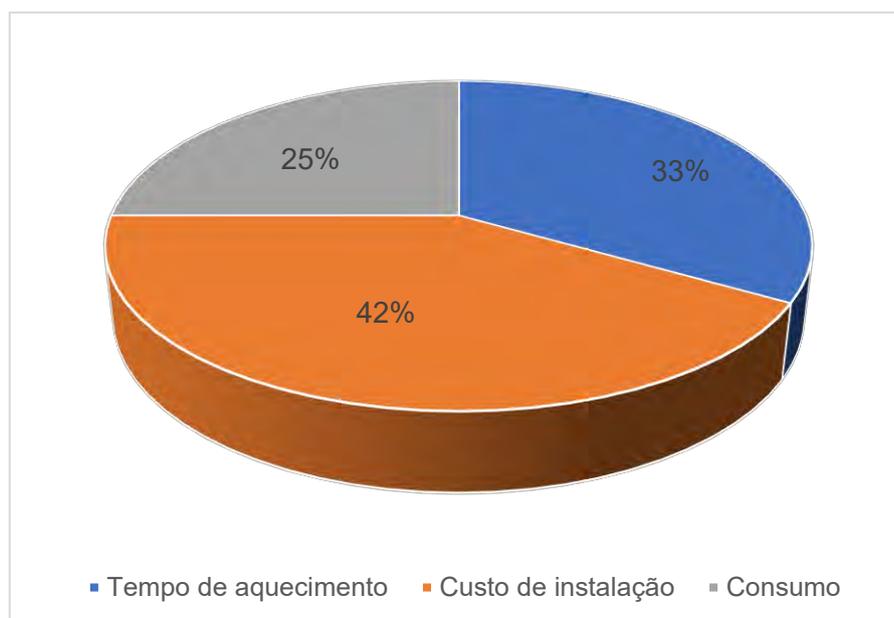
Todas as empresas consideraram que o conforto térmico que o piso radiante hidráulico proporciona é o que mais satisfaz os usuários desse sistema. Além do mais, algumas empresas também disseram que um dos grandes motivos pela procura do piso aquecido, além do conforto térmico, é a interferência estética, uma vez que o aquecimento do piso fica invisível e não altera a decoração do ambiente.

Uma das empresas destacou que os clientes também costumam elogiar a questão da movimentação do ar. Como no aquecimento de piso não há movimentação do ar, ele acaba não elevando a poeira. A movimentação do ar e a consequente

elevação da poeira ocorre em alguns outros sistemas de condicionamento, como o ar condicionado.

As empresas não destacaram somente os elogios, mas também as principais reclamações feitas pelos usuários em relação ao sistema de aquecimento, como pode-se observar no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Principais reclamações dos usuários



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se que as principais reclamações dos usuários são em relação ao tempo de aquecimento, o custo de instalação e o consumo do sistema. A empresa F fez uma observação muito importante quanto ao consumo. Segundo ela, muitos clientes levam em consideração somente o custo inicial e acabam instalando caldeiras mais baratas. Contudo, quanto menor o investimento inicial, mais caro para manter o sistema depois.

O Gráfico 8 apresenta a porcentagem de empresas que possuem um monitoramento de satisfação dos usuários.

Gráfico 8 - Monitoramento de satisfação dos usuários



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se no Gráfico 8 que a maior parte das empresas não possui um monitoramento de satisfação dos usuários. Das empresas entrevistadas, somente a empresa B declarou que possui esse monitoramento. Segundo a empresa B, o monitoramento de satisfação dos usuários ocorre através de um questionário enviado aos clientes. Os clientes devem dar uma nota ao atendimento, instalação e entre outros quesitos que compõe o questionário. Ao final do mês é feita uma análise dos índices de qualidade. Todavia, a empresa destacou que menos de 30% dos clientes respondem aos questionários.

Já a empresa G, que não possui um monitoramento de satisfação dos usuários, acredita que os clientes estão contentes quando não estão reclamando, já que, segundo eles, ninguém retorna para dar um elogio, somente para reclamar.

Logo, nota-se que as empresas entrevistadas não possuem o interesse em saber o grau de satisfação dos usuários desse sistema. Contudo, através desse monitoramento seria possível entender os pontos positivos e negativos a fim de melhorar a qualidade de seus serviços e produtos.

4.1.9 Dados Relacionados aos Produtos

Nesta seção foram abordados os resultados obtidos em relação à geração de ruídos do sistema, ao custo de implementação do piso radiante hidráulico, e também foi feita uma comparação de custo em relação ao piso radiante elétrico, além de identificar os benefícios e desvantagens de cada um deles.

Todas as empresas entrevistadas informaram que o sistema de PRH não gera nenhum tipo de ruído ou barulho durante o seu funcionamento.

Quanto ao piso radiante elétrico, 57% das empresas entrevistadas relataram que trabalham com esse sistema, enquanto 43% das empresas informaram que trabalham somente com o piso radiante hidráulico.

As empresas que trabalham com o sistema elétrico declararam quais são os sistemas mais vendidos na empresa. Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Pisos mais vendidos pelas empresas

Empresa	Pisos mais vendidos
A	Elétrico
B	Elétrico
C	Elétrico
D	Hidráulico

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dentre as justificativas das empresas que elencaram que o piso radiante elétrico é o mais procurado pelos clientes, destacam-se:

- Utilização do piso radiante elétrico em conjunto com o sistema fotovoltaico, o que acarreta na redução do consumo de energia;
- Aquecimento de um só ambiente, o que se torna inviável utilizar o piso radiante hidráulico;
- Consumo inferior ao piso radiante hidráulico.

Quanto às vantagens e desvantagens do piso radiante elétrico, as empresas A e C relataram que uma das vantagens é a velocidade de aquecimento do sistema, e a principal desvantagem é o consumo, que comparado com o sistema hidráulico, é muito maior.

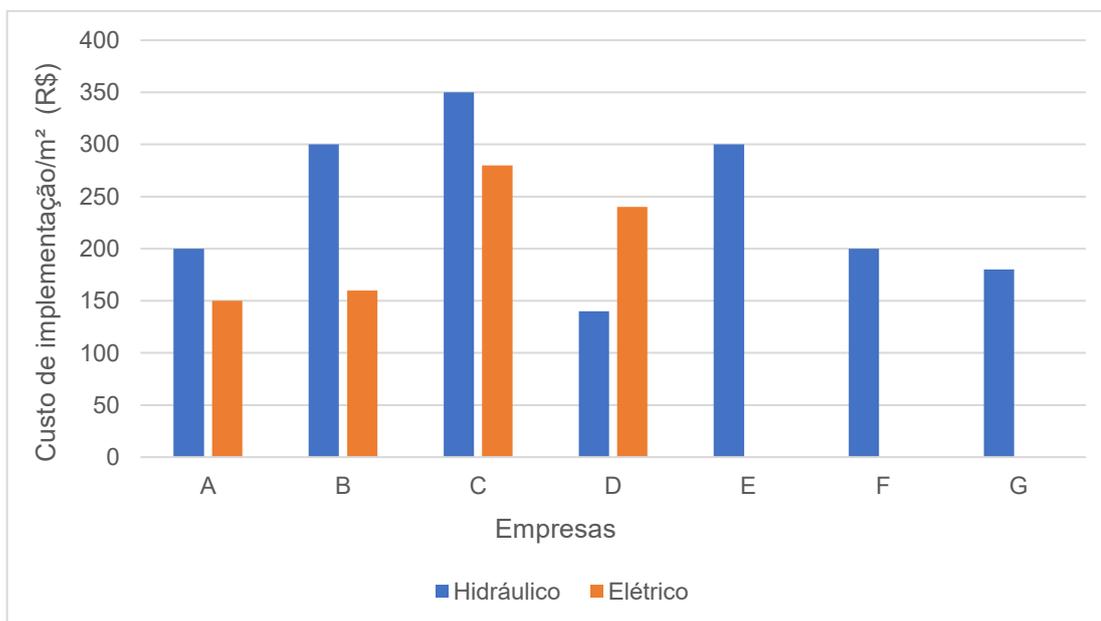
As empresas B e D consideram que uma das vantagens do sistema elétrico é o seu baixo custo de implementação, principalmente em áreas menores, e a desvantagem é o alto custo operacional em comparação com o piso radiante hidráulico.

4.1.9.1 Custo de Implementação dos Pisos

Foi realizada uma comparação entre o custo de implementação por m² entre os pisos radiantes hidráulicos e os elétricos. Nessa comparação, o custo de implementação do piso elétrico foi considerado para as empresas que trabalham com ele (A, B, C e D). As empresas E, F e G não obtiveram nenhum resultado porque não trabalham com esse sistema.

Como pode-se notar no Gráfico 9, o custo de implementação do piso radiante hidráulico costuma ser superior ao piso radiante elétrico. Somente a empresa D apresentou um custo de implementação do sistema elétrico superior ao hidráulico. Segundo a empresa D, o piso elétrico que a empresa trabalha possui cabos calefadores diferentes dos utilizados pelos concorrentes, por isso o preço acaba sendo superior.

Gráfico 9 - Custo de implementação dos pisos radiantes hidráulicos e elétricos



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em relação ao custo do sistema de piso radiante hidráulico, é importante ressaltar que esse custo de implementação divulgado pelas empresas não inclui a caldeira. De acordo com as empresas, o custo das caldeiras varia muito devido às diferentes fontes de energia que podem ser utilizadas.

4.1.10 Análise Geral das Entrevistas

O resultado das entrevistas mostrou que o sistema de piso radiante hidráulico está sendo inserido no Rio Grande do Sul de maneira muito semelhante por diferentes empresas. Porém, nesta Seção serão discutidos alguns resultados relevantes em relação às respostas apresentadas anteriormente.

Projeto: Em relação ao projeto, todas as empresas entrevistadas instalam somente o sistema de aquecimento de piso, utilizam o mesmo material e diâmetro do tubo, além de não executarem o sistema com emendas. Esses dados mostram uma certa padronização em relação ao sistema executado no Estado do Rio Grande do Sul.

No entanto, observou-se uma diferença no espaçamento utilizado entre os tubos e no material da camada de isolamento. Apesar de todas as empresas terem citado um espaçamento que varia entre 15 a 20 cm, grande parte delas relatou que utiliza algum critério diferente na escolha desse espaçamento. Isso mostra uma certa incerteza, visto que essa diferença de 5 cm influencia diretamente na temperatura da superfície do piso, na temperatura do ar, na condição de conforto térmico dos usuários e também no custo do sistema.

Quanto a camada de isolamento, as empresas B, C, E e G utilizam um poliestireno expandido de alta densidade, enquanto as empresas A, D e F utilizam uma manta de polietileno. Esses dois materiais são diferentes porque possuem componentes, espessuras, condutividades térmicas e desempenho térmico distintos. Logo, não se tem conhecimento em relação ao material que possui melhor desempenho. De acordo com Jeong e Jung (2015), os materiais de isolamento utilizados em pisos radiantes devem ser selecionados com base na correlação entre a densidade e a condutividade térmica dos materiais. Portanto, seria importante um estudo que avaliasse o desempenho desses dois materiais utilizados como camada de isolamento no estado do Rio Grande do Sul, e identificasse qual possui o melhor custo benefício.

Quanto a espessura da camada de isolamento, a norma EN 1264-3 (2009b) utiliza fórmulas para determinar a sua espessura, de acordo com o fluxo de calor e a condutividade térmica do material isolante. Entretanto, os resultados desse trabalho mostraram que a espessura dos materiais utilizados no Rio Grande do Sul é padronizada e não difere de acordo com as características do projeto.

Outra diferença identificada entre as empresas foi em relação a disposição das tubulações. Foram citados dois formatos diferentes, entre eles: o formato serpentina e o formato caracol. Esses dois formatos são comuns de serem utilizados no mundo todo, no entanto, eles possuem distribuições de temperatura diferentes, o que influencia diretamente no desempenho térmico do sistema. O formato caracol tem a vantagem de permitir um espaçamento menor entre os tubos e distribuir o calor de maneira mais uniforme que o formato em serpentina (REHAU, 2017). Portanto, as empresas que utilizam formato caracol, ou seja, as empresas B, C, D e G, possuem um sistema que distribui o calor de maneira mais uniforme que as demais empresas.

Outra análise considerada importante, é que nenhuma das empresas entrevistadas utilizam *softwares* para simular o desempenho térmico e energético do sistema. Essa atitude apresenta uma preocupação, pois além dos entrevistados terem mostrado desconhecimento sobre o tema, o uso do *software* auxilia na verificação do desempenho térmico e energético dos ambientes em que o sistema será instalado. Os *softwares* de desempenho térmico avaliariam o desempenho do sistema de acordo com os materiais de construção utilizados, com a previsão dos ganhos de calor e também com o controle escolhido pelo cliente/usuário. Logo, os sistemas seriam projetados de forma individualizada, respeitando as suas características e limitações.

Sistema de aquecimento central: Em relação ao sistema de aquecimento central, observou-se que todas as empresas entrevistadas utilizam caldeiras para aquecer a água que passa pela tubulação. A diferença entre as caldeiras, é a fonte de abastecimento delas, que vai de acordo com a necessidade e o orçamento do cliente. Segundo Sarbu, Mirza e Crasmareanu (2017), as caldeiras possuem a vantagem de serem comercializadas em diversos tamanhos, o que reduz os problemas relacionados ao espaço necessário para o armazenamento.

Quanto ao dimensionamento do sistema, observou-se, de maneira geral, que as empresas não tinham conhecimento de como o sistema era dimensionado, das fórmulas utilizadas para o dimensionamento ou dos manuais utilizados para auxílio dos cálculos. Esses dados mostram uma grande preocupação porque o dimensionamento correto do sistema é essencial para que não seja gasto mais energia do que o necessário, para que a temperatura da água não ultrapasse o recomendado ou que fique muito abaixo do ideal, fazendo com que o sistema não

aqueça adequadamente. Logo, o dimensionamento correto do sistema implica diretamente no desempenho térmico e no conforto dos usuários.

Em relação à instalação do piso, as empresas entrevistadas executam de maneira muito semelhante. Nessa parte, destaca-se a importância de utilizar a cinta perimétrica ao longo da parede a fim de evitar as pontes térmicas e impedir o rompimento do piso. A cinta é essencial porque o aquecimento do piso faz com que a argamassa que envolve a tubulação comece a dilatar. Essa dilatação do material requer que haja um espaço necessário para que ele se “movimente” sem romper o piso. Por isso as cintas são colocadas entre o piso e a parede e são cortadas somente ao final da instalação (NHBC, 2016).

Controle: Conforme o esperado, todas as empresas de piso radiante hidráulico utilizam a mesma forma de controle, que são os termostatos. Segundo Giacomini (2017), os termostatos possuem um sensor de umidade relativa integrada e permitem que os usuários definam as condições térmicas desejadas.

Em relação a temperatura da água, somente a empresa G apresentou uma temperatura superior a recomendada pela EN 1264-3 (2009b). Por isso, há uma tendência de que quanto maior a temperatura da água, mais rápido o sistema irá aquecer. Nesse caso, a empresa G apresentou um tempo de aquecimento superior às empresas B, D e E, que mencionaram uma temperatura da água inferior. Um dos motivos da empresa G ter relatado um tempo de aquecimento superior, mesmo utilizando uma temperatura da água maior, é pelo fato de que a empresa G utiliza a maior espessura de argamassa sobre a tubulação, o que acaba dificultando a transferência de calor.

Além do mais, todas as empresas relataram que o comando do piso radiante hidráulico pode ser verificado através da caixa de distribuição. A caixa de distribuição é o primeiro componente do sistema a ser instalado e deve ser posicionado de forma a reduzir o comprimento dos tubos de alimentação ao mínimo. Isso evitará que longos comprimentos de tubagem possam dificultar o controle da temperatura nos ambientes. Geralmente o coletor é instalado em caixas especiais ou nichos, a uma altura que facilita a ligação dos tubos. Para evitar que a água de aquecimento entre nos circuitos em uma temperatura excessiva, é importante que se tenha um dispositivo de segurança que funcione mesmo em casos de falha de energia (GIACOMINI, 2017).

Normas: Quanto ao atendimento de normas ou manuais, a empresa B destacou-se porque foi a única que relatou seguir algumas orientações da norma EN 1264. A falta de uma normativa brasileira interfere diretamente na qualidade e no desempenho dos sistemas radiantes instalados no Brasil. Por este motivo, seria importante que o Brasil elaborasse uma norma, assim como a EN 1264, que apresentasse os métodos de dimensionamento, como o cálculo da potência térmica, temperatura da água, espessura da camada de isolamento, espaçamento entre os tubos, diâmetro do tubo, forma de instalação, verificação do desempenho e etc.

Materiais e Mão de Obra: Todas as empresas entrevistadas relataram utilizar materiais importados e realizar treinamentos aos funcionários. De acordo com Trennel (2017), para que o sistema de piso radiante possua uma alta eficiência é importante que os materiais utilizados sejam de uma boa qualidade e atendam as normas técnicas de seus respectivos países. Ademais, os profissionais que projetam e executam o sistema precisam ter conhecimento suficiente para que o sistema seja projetado e instalado de maneira correta.

Pós venda: Nesse trabalho, todas as empresas comentaram que no piso não há nenhuma manutenção a ser realizada, somente nas caldeiras. Giacomini (2017) relata que cada componente do sistema apresenta uma vida útil longa, geralmente mais longa do que a do edifício. Um exemplo, são os tubos em PEX que não estão sujeitos a rupturas devido a corrosão porque possuem uma camada que impede a passagem do oxigênio. Além deles, a camada de isolamento também possui grande vida útil porque é resistente às cargas de instalação e fenômenos ambientais. Os outros componentes não requerem cuidados específicos, pelo fato de possuírem poucas partes mecânicas que podem ser afetadas pelo desgaste.

Quanto ao monitoramento de satisfação dos usuários, a empresa B se mostrou a mais preocupada com a qualidade do seu serviço e com a opinião do seu cliente. Além de dimensionar e executar o sistema de forma correta, é essencial que as empresas reconheçam os seus pontos positivos e negativos para que consigam avaliar as suas estratégias a fim de melhorar o seu atendimento e garantir que o cliente retorne a empresa.

Produtos: Conforme apresentado, tanto o piso radiante elétrico, quanto o piso radiante hidráulico possuem vantagens e desvantagens. Por isso, não há um sistema que seja melhor ou pior que o outro. Nesse caso, é importante avaliar a necessidade

do cliente e o quanto ele está disposto a investir no sistema, visto que, o sistema hidráulico tende a apresentar um custo superior ao sistema elétrico.

Trennel (2017) também destaca que o uso dos pisos radiantes tem a capacidade de valorizar o imóvel, já que muitos compradores estão dispostos a pagar a mais por residências que possuam aquecimento no piso.

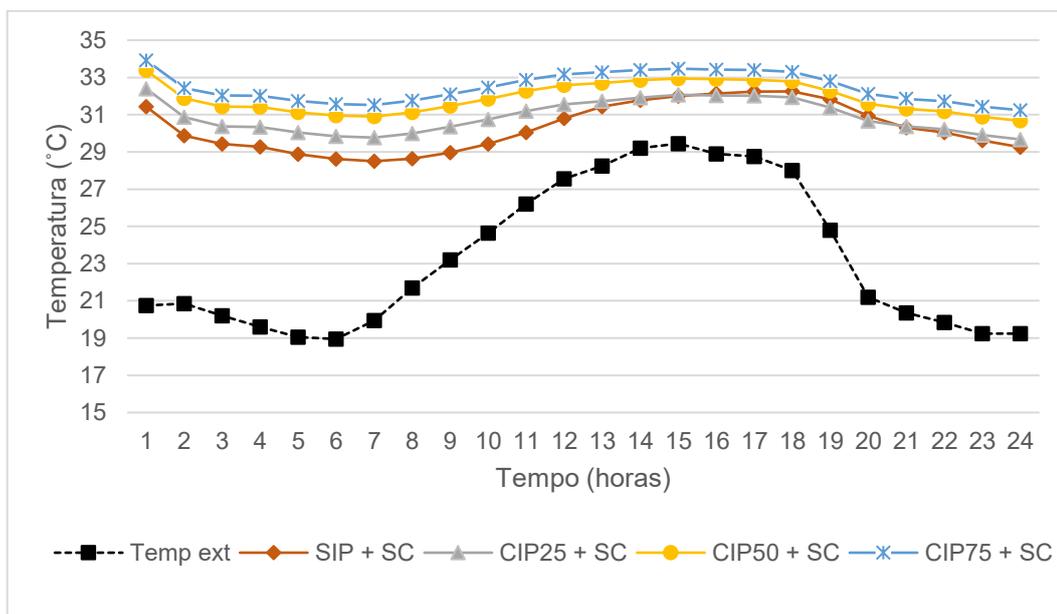
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O resultado das simulações realizadas nos modelos com e sem a presença do isolamento térmico na parede estão descritos nessa seção.

4.2.1 Temperatura do Ar dos Modelos em um Dia Típico de Verão

A primeira análise realizada foi a da temperatura do ar interno e externo em um dia típico de verão (1 de janeiro), como mostra o Gráfico 10.

Gráfico 10 - Temperaturas internas e externa dos modelos sem condicionamento térmico



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

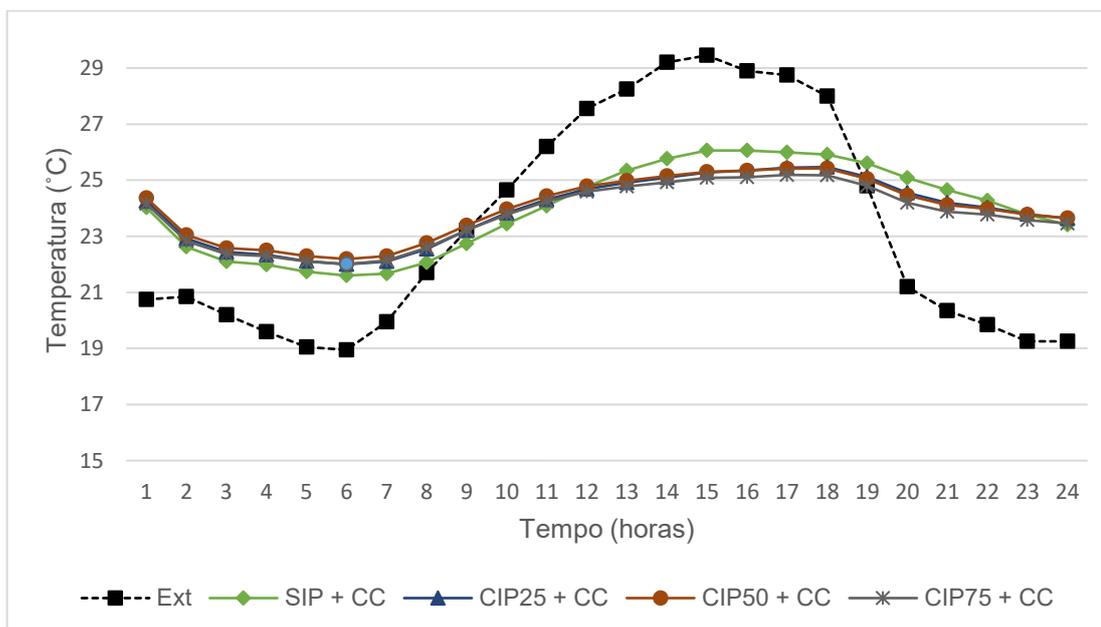
Neste dia, as simulações mostraram que, em grande parte do dia, a temperatura do ar no interior do ambiente aumentava à medida em que se elevava a espessura do isolamento térmico da parede. Isso ocorreu pelo fato de que quanto maior a espessura do isolamento térmico, mais lenta será a transferência de calor, o que implica em uma variação de temperatura inferior. Por isso, o modelo sem

isolamento térmico na parede e sem condicionamento térmico (SIP+SC), apresentou temperaturas um pouco inferiores no verão em praticamente todo o dia, exceto das 16:00 às 20:00, quando o modelo com isolamento térmico na parede de 25 mm (CIP25+SC) atingiu temperaturas superiores ao modelo sem isolamento térmico na parede (SIP+SC). Ainda assim, o modelo sem isolamento térmico na parede atingiu temperaturas muito elevadas.

Como pôde-se observar, em um dia típico de verão, o isolamento térmico na parede não foi suficiente para manter temperaturas mais amenas, entre 20 °C e 26 °C, uma vez que essas temperaturas ficaram entre 29,7 °C e 33,9 °C. Por isso, entendeu-se que esses modelos necessitariam de condicionamento térmico para reduzir as temperaturas internas do ar e melhorar o conforto térmico.

O Gráfico 11 apresenta as temperaturas do ar no interior do ambiente com condicionamento térmico no dia 1 de janeiro.

Gráfico 11 - Temperatura do ar nos modelos com condicionamento térmico



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível notar que o modelo sem isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (SIP + CC) foi o que apresentou maior variação de temperatura ($\Delta T = 3,8 \text{ }^\circ\text{C}$). Além disso, verifica-se que a presença do isolamento térmico na parede (CIP) não influenciou na temperatura do ar porque as temperaturas no modelo sem o isolamento térmico na parede (SIP) e nos modelos com o isolamento

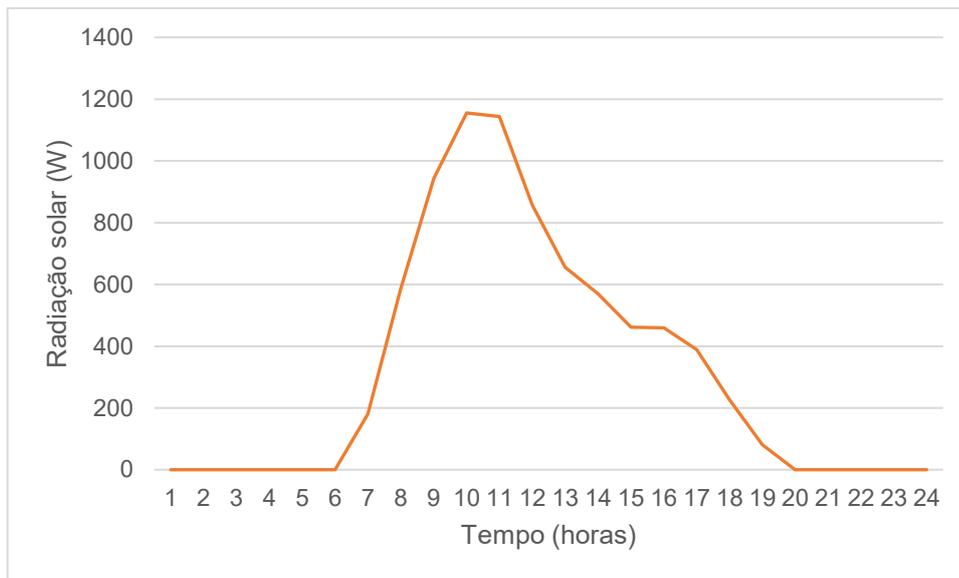
térmico (CIP) são muito semelhantes. Essa semelhança ocorre porque o resfriamento do piso foi acionado quando as temperaturas do ar ultrapassaram os 26 °C. Com isso, as temperaturas de todos os modelos ficaram entre 21,6 °C e 25,4 °C. Logo, o uso do isolamento térmico na parede não influenciou na temperatura do ar quando o condicionamento térmico foi acionado devido ao controle da temperatura.

Sendo assim, se o objetivo do usuário fosse somente resfriar esse ambiente, o uso do isolamento térmico na parede não seria imprescindível se analisado somente a temperatura do ar. Porém, os modelos simulados para um dia típico de verão não estão considerando uma situação tão próxima da realidade, uma vez que não foi considerado a ventilação natural, as estratégias de sombreamento e abertura das esquadrias.

Então, um dos motivos pelo qual as temperaturas internas do ar estão bem elevadas é pelo fato de que as esquadrias não possuem persianas, o que resulta em um ambiente onde a radiação solar incide diretamente pelas esquadrias. Para resolver essa questão seria importante analisar estratégias de sombreamento Frandoloso *et al.* (2019) relataram em um estudo realizado na cidade de Passo Fundo que ambientes com brises soleil externos bloquearam a entrada de raios solares, reduzindo a entrada de calor. Apesar desse ambiente estudado não possuir isolamento térmico na parede, ele possuía vidros semelhantes ao utilizado nesse trabalho, ou seja, com baixa estanqueidade, facilitando a perda de calor.

No Gráfico 12 é possível visualizar a radiação solar que está entrando no ambiente durante o dia 1 de janeiro.

Gráfico 12 - Radiação solar em um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se que, em um dia típico de verão, a energia do sol entra no ambiente por volta das 7:00 e diminui até cessar por volta das 19:00, quando começa a escurecer. Neste dia, o pico de energia foi de 1155 W e ocorreu por volta das 10:00. Como anteriormente visto, a sala de estar durante o verão é muito quente, necessitando de resfriamento no piso para que os usuários sintam-se mais confortáveis. Logo, o resfriamento do piso precisa retirar essa energia que está entrando na sala de estar para reduzir a temperatura do ar no interior do ambiente e aumentar a condição de conforto térmico. Por isso, quanto maior a incidência solar, mais energia será necessária para retirar o calor do ambiente.

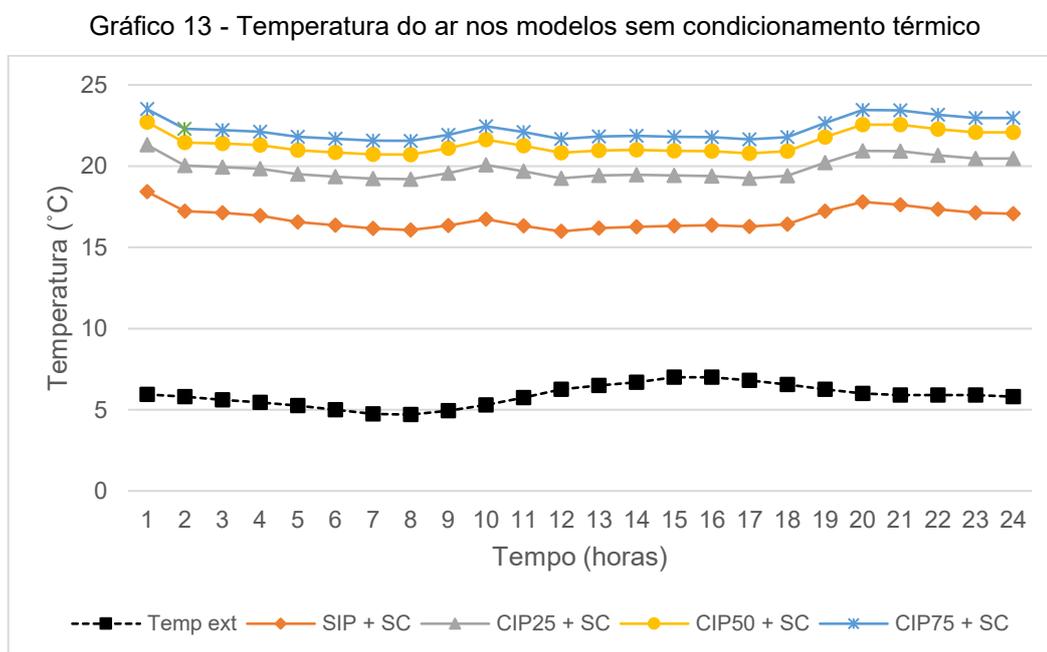
Além do mais, os resultados seriam mais satisfatórios com a ventilação natural, ou seja, as temperaturas internas no interior do ambiente seriam inferiores em um dia típico de verão. Essa análise é confirmada por Chvatal (2007), que acredita que a ventilação natural é capaz de reduzir significativamente o sobreaquecimento. Com isso, uma envolvente altamente isolada pode trazer economia de energia sem elevação do sobreaquecimento no verão, desde que haja um controle dos ganhos solares nesse período. Por isso, uma forma de reduzir o desconforto térmico é utilizando estratégias para diminuir a quantidade de radiação solar que está entrando no ambiente.

Assim como Chvatal (2007), Ribeiro (2008) também afirmou que a radiação solar é a principal responsável pelo desconforto térmico em climas quentes, como é o

caso do verão no Rio Grande do Sul. Por este motivo, o autor recomenda o uso de proteções solares para minimizar o aquecimento das vedações e dos ambientes internos. Isso é possível com estratégias de sombreamento e utilizando persianas nas janelas.

4.2.2 Temperatura do Ar dos Modelos em um Dia Típico de Inverno

O Gráfico 13 apresenta a temperatura do ar dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno (21 de junho).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O modelo sem isolamento térmico na parede e sem condicionamento térmico (SIP + SC) apresentou temperaturas internas do ar inferiores a 20 °C, o que representa um ambiente mais frio, já que esse trabalho está considerando uma temperatura confortável entre 20 °C e 26 °C. Frandoloso (2019) mostrou que, na cidade de Passo Fundo, um modelo sem isolamento térmico na parede também causou um desconforto térmico aos usuários, principalmente no inverno.

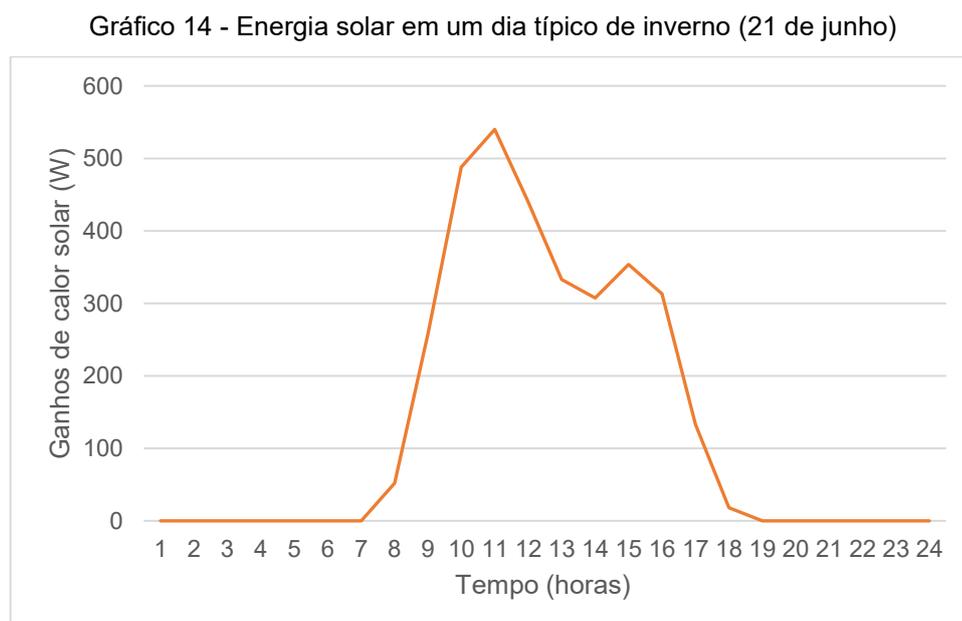
No entanto, observa-se que a presença do isolamento térmico na parede (CIP75 + SC) aumentou a temperatura do ar em até 5,9 °C no interior da sala de estar comparado com o modelo sem o isolamento (SIP + SC). Logo, a temperatura do ar no interior do ambiente elevou-se com o aumento da espessura do EPS.

Então, verifica-se que, no inverno, a presença do isolamento térmico teve grande influência porque reduziu a interação com o ambiente externo, o que resultou em um aumento da temperatura do ar. Esse aumento fez com que as temperaturas ficassem próximas a 20 °C e 23 °C.

O Gráfico 13 também mostra que utilizando a menor espessura de EPS na parede (CIP25), representada pela linha cinza, é possível atingir temperaturas entre 19,2 °C e 21,3 °C ($\Delta T = 2,1$ °C). Enquanto isso, com 50 mm de EPS foi possível atingir temperaturas entre 20,7 °C e 22,7 °C ($\Delta T = 2,0$ °C), e com 75 mm de EPS essas temperaturas variaram entre 21,6 °C e 23,5 °C ($\Delta T = 1,9$ °C). Essas variações de temperatura mostram que quanto menor a variação, menor a interação do ambiente interno e o externo e mais eficiente será o isolamento térmico.

Portanto, se analisado somente a temperatura do ar em um dia típico de inverno, não seria essencial o uso do condicionamento térmico (CC) no ambiente porque as temperaturas atingidas ficaram próximas às temperaturas utilizadas como base no conforto térmico desse trabalho, entre 20 °C e 26 °C. Contudo, entende-se que esse trabalho não considerou as trocas de ar, que provavelmente também influenciariam nos resultados, reduzindo a temperatura do ar.

O Gráfico 14 apresenta a radiação solar incidente na sala de estar durante um dia típico de inverno (21 de junho).



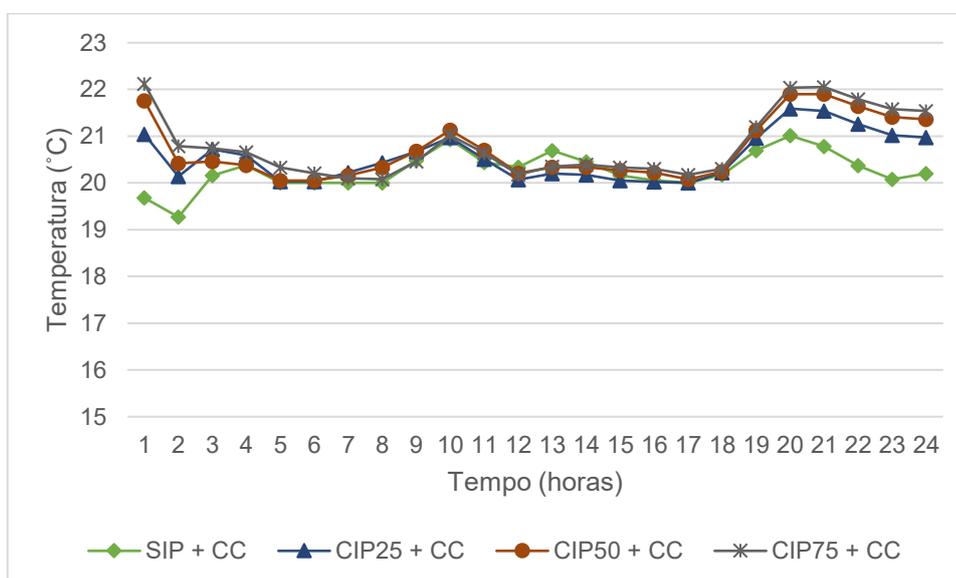
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Percebe-se, no Gráfico 14, que a radiação solar entrou no ambiente por volta das 8:00 horas e teve o seu pico de 540 W às 11:00 horas. Logo, a radiação solar durante um dia típico de verão é praticamente duas vezes maior se comparada a um dia típico de inverno. Nesse caso, a incidência solar direta favoreceu no aquecimento do ambiente, enquanto em um dia típico de verão ela desfavoreceu, sendo necessário o uso de outras estratégias para reduzir a temperatura.

Por este motivo, Linczuk (2015) aconselha ter cautela na adoção da estratégia de ampliação dos ganhos de calor pelas janelas e isolamento do piso durante o inverno, já que há a possibilidade de superaquecimento da edificação no verão, ainda que a estratégia seja eficiente para o inverno.

Apesar da temperatura interna do ar dos modelos sem o condicionamento térmico durante um dia típico de inverno apresentarem resultados considerados satisfatórios, ou seja, próximos a 20 °C e 26 °C, foram realizadas simulações dos modelos com o condicionamento térmico, conforme ilustra o Gráfico 15.

Gráfico 15 - Temperatura do ar nos modelos com condicionamento térmico



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se que a variação de temperatura no inverno foi muito pequena nos modelos com isolamento térmico na parede (CIP25, CIP50 e CIP75), comparado com o modelo sem o isolamento térmico na parede (SIP + CC). Ainda assim, é possível observar que o modelo com 75 mm de EPS na parede (CIP75 + CC) obteve maior variação de temperatura.

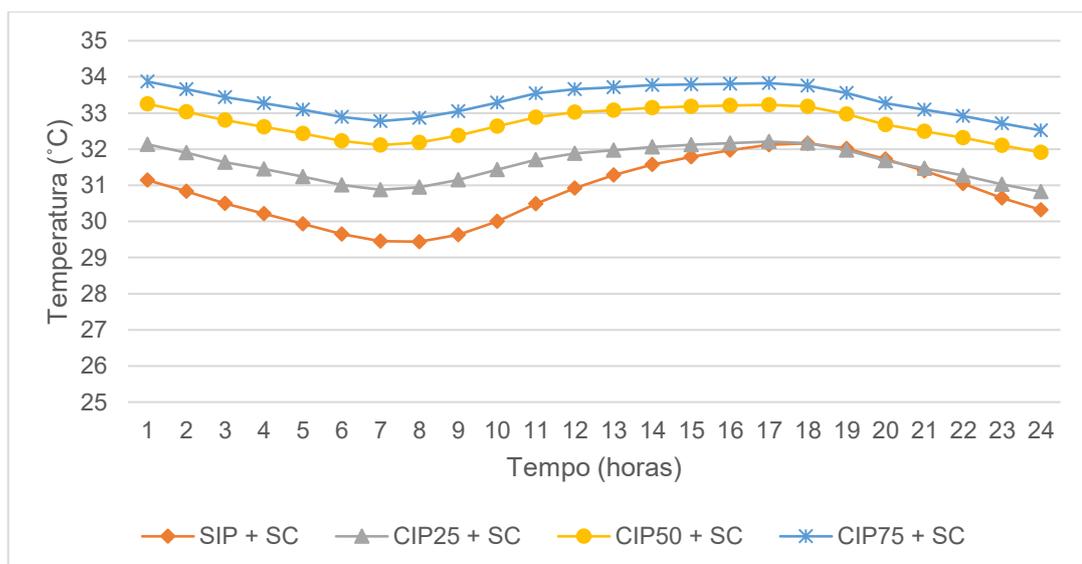
Analisando a temperatura do ar nos ambientes com e sem o isolamento térmico na parede durante um dia típico de inverno, é possível comprovar a importância de manter um ambiente termicamente isolado, principalmente no inverno, onde o objetivo é manter as temperaturas mais altas e evitar a perda de calor para o ambiente externo. Neste caso, os modelos simulados sem o condicionamento térmico atingiram temperaturas consideradas “agradáveis”, entre 20 °C e 26 °C, em grande parte do dia 21 de junho, utilizando somente o isolamento térmico na parede e vidro simples.

Possivelmente as temperaturas do ar seriam ainda mais elevadas se os modelos simulados tivessem vidros duplos nas esquadrias, já que a perda de calor para o ambiente exterior seria menor. Essa análise é confirmada pelo estudo de Linczuk (2015), que mostrou que o uso do vidro duplo em um modelo localizado na Zona Bioclimática 2 foi capaz de reduzir a necessidade de aquecimento em 4% nos meses mais frios.

4.2.3 Temperatura Radiante dos Modelos em um Dia Típico de Verão

O Gráfico 16 apresenta a temperatura radiante média (Trm) dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão (1 de janeiro).

Gráfico 16 - Temperatura radiante dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O modelo sem isolamento térmico na parede e sem condicionamento térmico (SIP + SC) foi o que registrou a menor temperatura radiante média (Trm) em

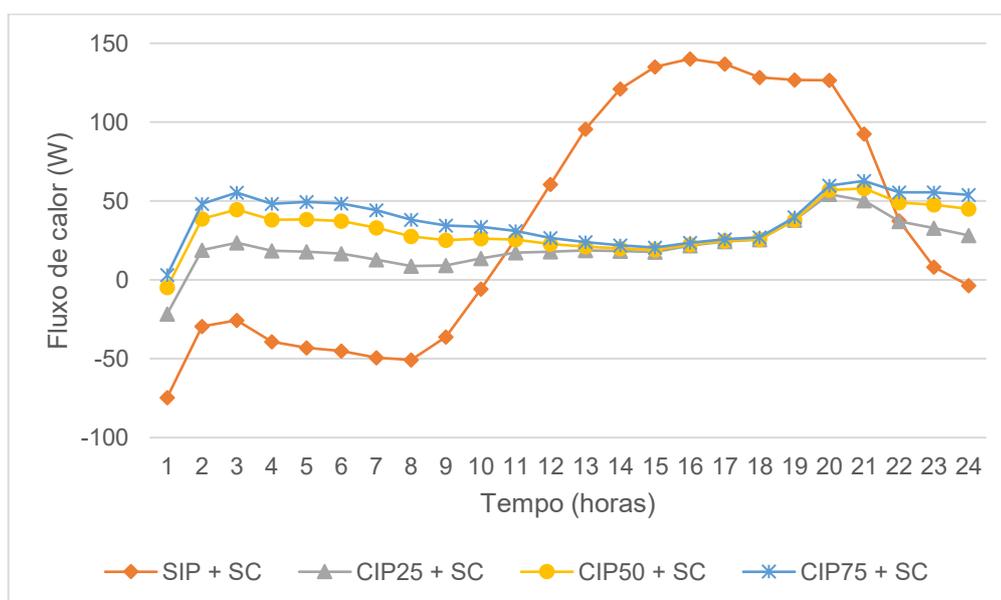
comparação com os demais modelos, ou seja, uma Trm de 29,4 °C. Enquanto isso, o modelo com maior espessura de EPS na parede (CIP75 + SC) registrou a maior temperatura radiante média entre todos os modelos, ou seja, uma Trm de 33,9 °C.

O modelo SIP + SC teve temperaturas radiantes inferiores aos demais modelos em grande parte do dia devido à ausência do isolamento térmico, uma vez que, à medida em que se retira o isolamento térmico, aumenta-se a interação entre o ambiente interno e o externo, o que influencia diretamente na temperatura da parede. Nesse caso, como as temperaturas externas são inferiores às internas, a interação entre o ambiente interno e externo reduziu as temperaturas radiantes do modelo SIP + SC.

Por este motivo, conforme o esperado, à medida em que se adicionou o isolamento térmico na parede, a temperatura radiante aumentou, o que explica o fato do modelo com 75 mm de EPS na parede (CIP75 + SC) atingir temperaturas radiantes superiores às dos modelos com 25 mm de EPS (CIP25 + SC) e 50 mm de EPS (CIP50 + SC).

O Gráfico 17 mostra o fluxo de calor, em watts, dos modelos sem o condicionamento térmico durante o mesmo dia (1 de janeiro).

Gráfico 17 - Fluxo de calor dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Constata-se que o modelo sem isolamento térmico na parede e sem condicionamento térmico (SIP + SC) teve uma perda de energia para o exterior maior

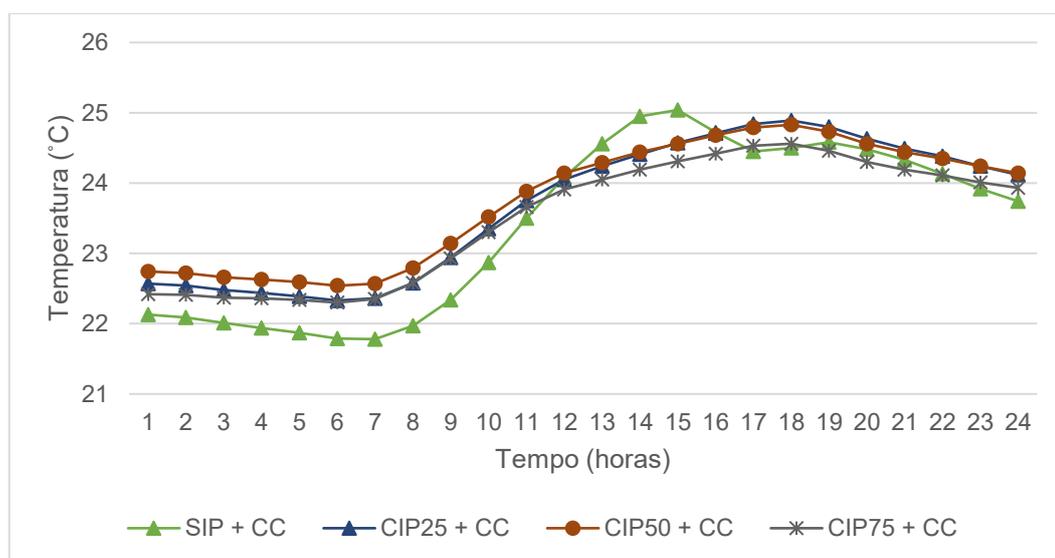
do que os demais modelos durante a noite. Essa perda de energia também é causada pela ausência do isolamento térmico, uma vez que, a presença do isolamento térmico na parede reduz a perda de energia para o exterior. Observa-se também que, entre as 9:00 e 10:00 horas, o modelo SIP + SC começou a ganhar calor. Nesse mesmo tempo, é possível notar, no Gráfico 16, que a temperatura radiante também se elevou.

Nos modelos com o isolamento térmico na parede (CIP25 + SC, CIP50 + SC e CIP75 + SC) houve um aumento no ganho de energia com o acréscimo da espessura do isolamento térmico. Passos (2016) acredita que esse evento ocorre devido à grande facilidade em se ganhar calor por meio da cobertura e da dificuldade em perdê-lo por meio das paredes, devido às configurações das mesmas. Por isso, em um dia típico de verão, notou-se que quando há perda de calor para o exterior, conseqüentemente, há uma redução na temperatura radiante.

Essa análise é comprovada por Chvatal (2007), que afirmou que quando os ganhos de calor no edifício são elevados, as paredes muito isoladas podem dificultar a dissipação desse calor e fazer com que a temperatura interior aumente acima do limite de conforto. Esse tipo de problema é mais susceptível de ocorrer em climas tropicais, os quais são sujeitos a verões mais quentes e insolados.

O Gráfico 18 apresenta a temperatura radiante média dos modelos com condicionamento térmico durante um dia típico de verão.

Gráfico 18 - Temperatura radiante dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de verão



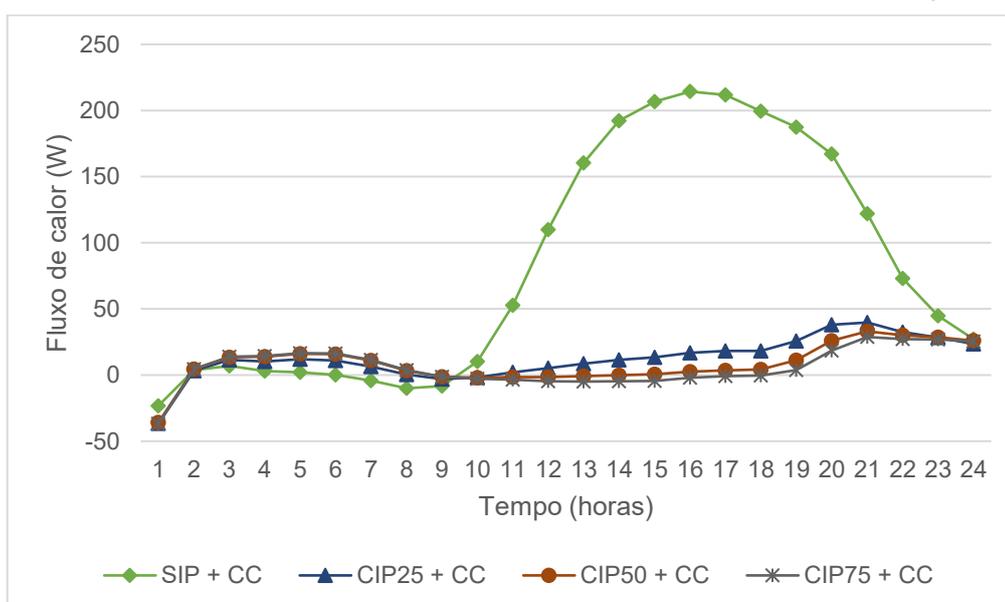
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se que com o condicionamento térmico a temperatura radiante de todos os modelos simulados reduziu significativamente. Enquanto a menor temperatura radiante encontrada nos modelos sem o condicionamento térmico (SC) foi de 29,4 °C, com o condicionamento térmico (CC) essa mínima caiu para 21,8 °C, ou seja, houve uma redução de 7,6°C.

Em relação ao isolamento térmico na parede, os modelos com isolamento térmico na parede CIP25 + CC, CIP50 + CC e CIP75 + CC tiveram uma variação de temperatura (ΔT) de 2,6 °C, 2,3 °C e 2,2 °C, respectivamente. Logo, a variação de temperatura entre os modelos com isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (CIP + CC) foi praticamente insignificante, inferior a 0,4 °C. Já o modelo sem o isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (SIP + CC) sofreu uma variação de temperatura maior ($\Delta T=3,3$ °C). Assim como mostrado anteriormente, o isolamento térmico não interferiu de maneira significativa porque o condicionamento térmico controla as temperaturas e as mantém próximas, mesmo com a presença do isolamento térmico na parede.

O Gráfico 19 apresenta o fluxo de calor dos modelos com o condicionamento térmico durante o dia 1 de janeiro.

Gráfico 19 - Fluxo de calor dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

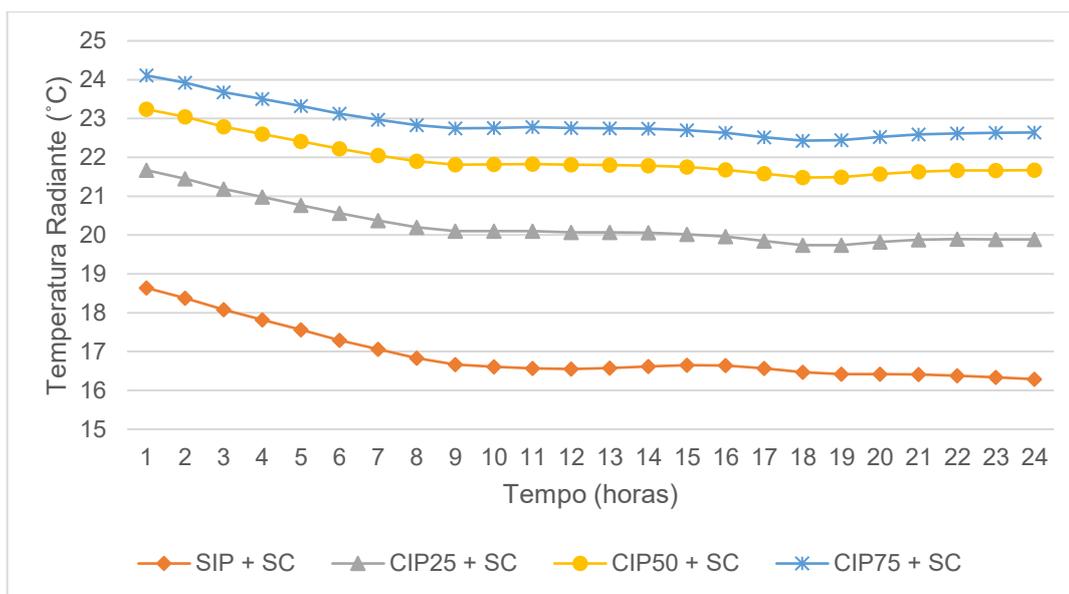
No Gráfico 19 percebe-se que os modelos com isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (CIP + CC) não tiveram uma variação significativa no

fluxo de calor com o aumento da espessura do isolamento térmico da parede. Contudo, o modelo sem o isolamento térmico na parede e com a presença do condicionamento térmico (SIP + CC) apresentou um ganho de energia elevado pelo fato de não ter o isolamento térmico na parede, o que causa uma interação maior entre o ambiente externo e o interno. Se comparado com o Gráfico 18, o modelo SIP + CC obteve maior variação de temperatura devido ao maior fluxo de calor em relação às simulações com isolamento térmico.

4.2.4 Temperatura Radiante dos Modelos em um Dia Típico de Inverno

O Gráfico 20 ilustra a temperatura radiante dos modelos sem isolamento térmico em um dia típico de inverno (21 de junho).

Gráfico 20 - Temperatura radiante dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

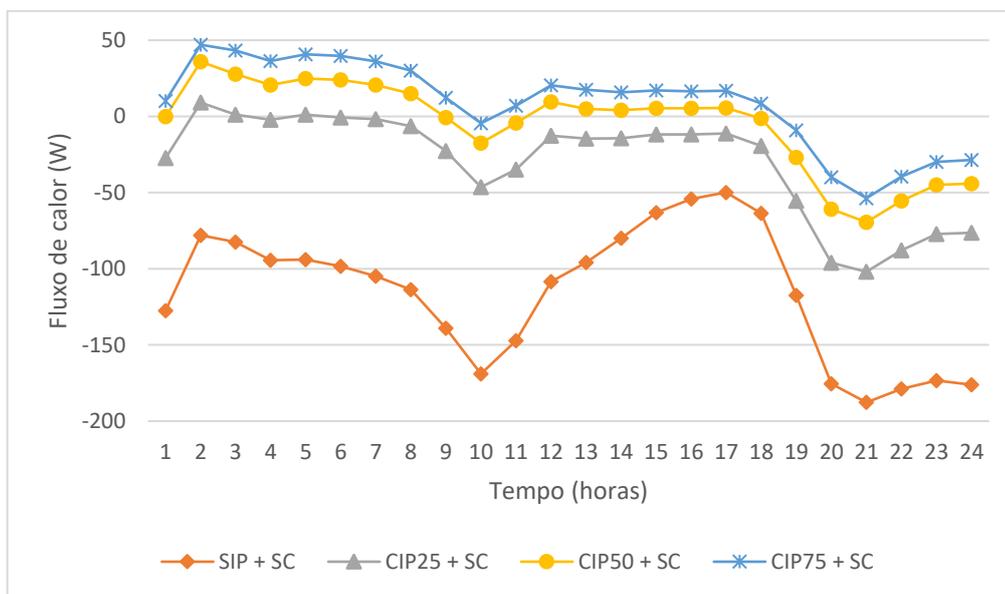
Observa-se que o modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) foi o que obteve maior variação de temperatura radiante comparado com os demais, já que ele atingiu um (ΔT) de 2,4 °C. Além disso, ele registou a menor temperatura radiante média (16,3 °C) dentre os modelos simulados. Enquanto isso, os modelos com o isolamento térmico na parede CIP25 + SC, CIP50 + SC e CIP75 + SC apresentaram uma variação de temperatura (ΔT) de 1,9 °C, 1,8 °C e 1,7 °C, respectivamente.

O modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) apresentou temperaturas inferiores porque a interação entre o ambiente externo e o ambiente interno é maior com a ausência do isolamento térmico na parede. Essa análise reflete nos resultados dos modelos CIP, onde as temperaturas ficaram superiores devido a menor interação entre o ambiente interno e externo, ou seja, apesar da temperatura externa do ar estar baixa, foi possível reduzir a interação com o ambiente externo devido a presença do isolamento térmico, que reduz a perda de calor.

Também é possível visualizar, de maneira clara, que com o aumento da espessura da camada de isolamento da parede obteve-se um acréscimo na T_{rm} durante todo o dia 21 de junho. Isso ocorreu porque quanto maior o isolamento térmico na parede, menor a variação de temperatura e menor a perda de calor.

O Gráfico 21 apresenta o fluxo de calor dos modelos sem condicionamento térmico durante o dia 21 de junho.

Gráfico 21 - Fluxo de calor dos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

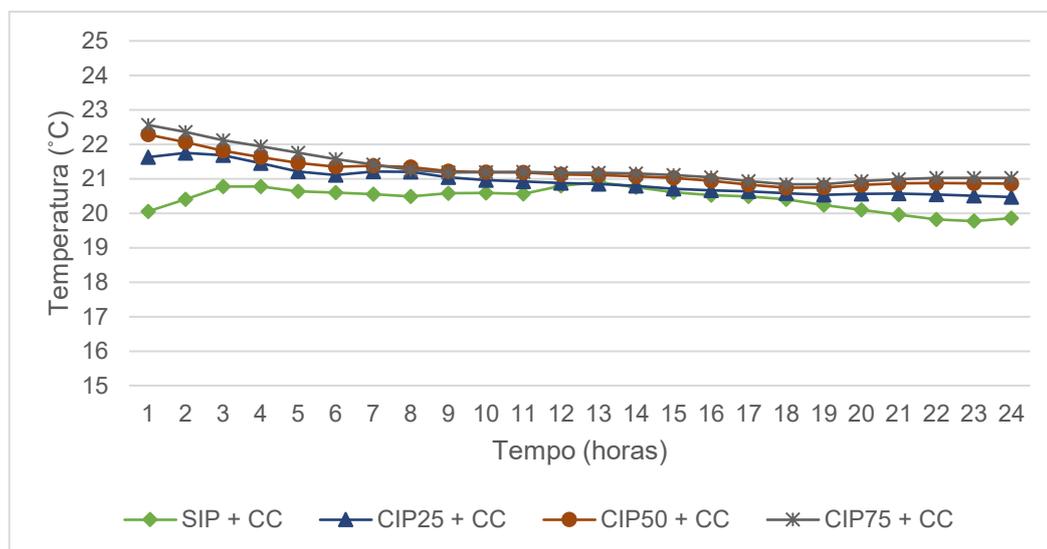
Verifica-se que o modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) resultou na maior perda de calor em comparação com os demais modelos. Um dos motivos desse modelo ter uma perda de energia muito superior é pelo fato de não ter o isolamento térmico na parede, o que aumenta muito a interação entre o ambiente externo e o interno. Logo, como nesse dia a

temperatura do ar no exterior estava baixa, consequentemente, a temperatura interna do ar e a temperatura radiante também ficaram reduzidas nesse modelo.

Enquanto isso, uma espessura de EPS maior na parede fez com que o modelo CIP75 + SC obtivesse maior ganho de energia. Se comparado com o Gráfico 20, o modelo CIP75 + SC também foi o modelo com maior temperatura radiante, pois quanto maior a espessura do isolamento térmico na parede, menor a perda de calor para o exterior.

Já o Gráfico 22 ilustra a Trm dos modelos com aquecimento de piso durante o dia 21 de junho.

Gráfico 22 - Temperatura radiante dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de inverno



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível constatar que o modelo que atingiu a menor temperatura radiante média foi o modelo sem o isolamento térmico na parede e com o condicionamento térmico (SIP + CC), sendo registrado 20,4 °C durante o dia 21 de junho. A variação de temperatura (ΔT) do modelo SIP + CC foi de 1,1 °C.

Por outro lado, os modelos com o isolamento térmico obtiveram uma Trm um pouco mais elevada. A variação de temperatura dos modelos com isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico CIP25 + CC, CIP50 + CC e CIP75 + CC, foi de 1,3 °C, 1,5 °C e 1,7 °C, respectivamente. Se essas variações de temperatura forem comparadas com os modelos sem o condicionamento térmico (SC), apresentados no Gráfico 20, nota-se que a presença do aquecimento não alterou

significativamente o ΔT dos modelos, sendo essa diferença inferior a $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ para os modelos com isolamento térmico na parede (CIP). Já os modelos sem o isolamento térmico na parede (SIP) tiveram uma diferença um pouco maior, de $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

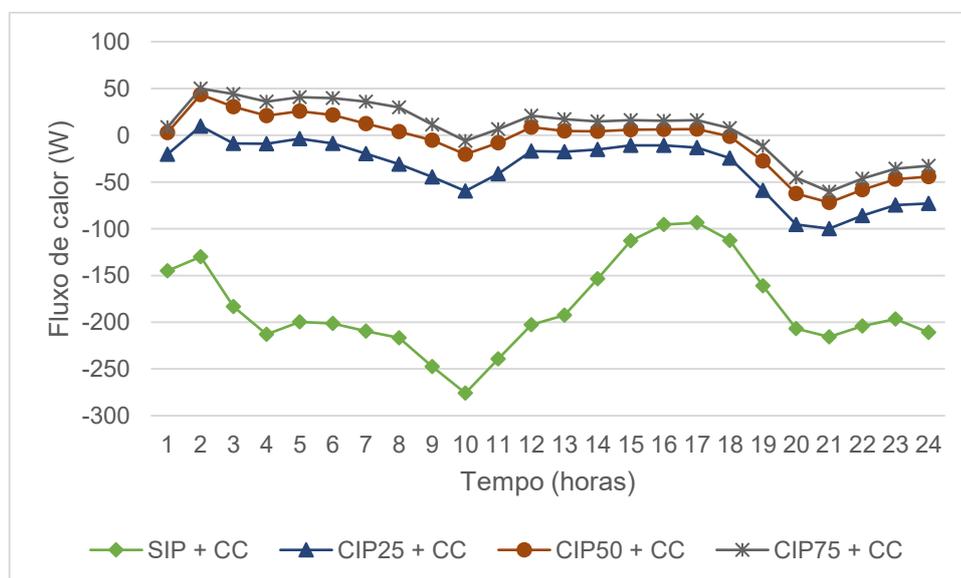
Assim como em um dia típico de verão, a presença do isolamento térmico não teve uma influência significativa nos modelos com o condicionamento térmico em um dia típico de inverno. Um dos motivos é pelo fato de que o condicionamento térmico mantém as temperaturas, por isso não há uma grande variação.

Se comparada a T_{rm} média dos modelos com isolamento térmico (CIP) nesse dia, nota-se que o modelo CIP75 + CC alcançou a maior T_{rm} média ($21,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), enquanto o modelo CIP25 + CC foi o que atingiu a menor T_{rm} ($20,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Por isso, a presença do isolamento térmico na parede elevou a temperatura radiante média dos modelos com condicionamento térmico, embora seja um aumento sutil, já percebe-se a sua influência positiva em um dia típico de inverno na cidade de Passo Fundo.

O Gráfico 23 mostra o fluxo de calor dos modelos com condicionamento térmico durante o dia 21 de junho.

Gráfico 23 - Fluxo de calor dos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de inverno



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Assim como no fluxo de calor dos modelos sem o condicionamento térmico, representado pelo Gráfico 21, o modelo sem o isolamento térmico na parede e com

condicionamento térmico (SIP + CC) também foi o que resultou nas maiores perdas de calor para o exterior, como mostra o Gráfico 23.

No Gráfico 23 é possível notar que os modelos com isolamento térmico na parede (CIP) tiveram um comportamento semelhante aos apresentados no Gráfico 21, ou seja, quanto maior a espessura do isolamento térmico na parede, maior o ganho de calor e, conseqüentemente, menor a perda de calor para o exterior.

Se comparado o Gráfico 21 e o Gráfico 23, nota-se que os modelos com o isolamento térmico na parede (CIP+SC e CIP+CC) praticamente se igualaram. Por outro lado, os modelos sem o isolamento térmico na parede, ou seja, os modelos SIP + SC e SIP + CC, obtiveram uma variação no fluxo de calor maior, porém, com comportamento semelhante porque os dois modelos tiveram somente perda de calor para o exterior, sem nenhum ganho. O modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) teve uma perda de calor menor que o modelo sem o isolamento térmico na parede e com o condicionamento térmico (SIP + CC) porque como a temperatura do ar do modelo SIP + CC ficou abaixo de 20 °C, automaticamente, foi acionado o sistema de aquecimento do piso. Com isso, o ambiente SIP + CC ficou aquecido, porém, como não havia nenhum tipo de isolamento nas paredes ou nas esquadrias, houve uma perda maior de energia para o exterior. Logo, o modelo sem o isolamento térmico na parede e com o condicionamento térmico (SIP + CC) teve uma perda de energia maior devido a energia injetada no piso.

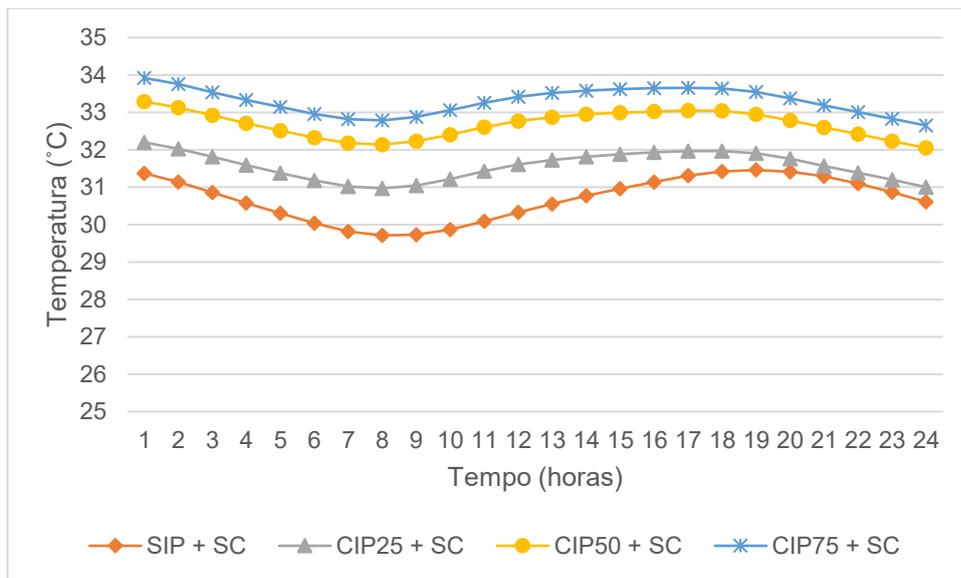
Portanto, quando acionado o aquecimento do piso em um ambiente sem isolamento térmico nas paredes aumenta-se a perda de calor para o exterior. Quando adicionado o isolamento térmico na parede, têm-se uma perda de calor menor e um aumento na temperatura radiante. Se os modelos simulados tivessem esquadrias com vidros duplos, o ambiente seria ainda mais isolado e, provavelmente, teria-se uma perda de calor ainda menor e um ganho de energia superior devido ao aumento na capacidade de armazenamento de calor desse ambiente.

Se avaliado somente o fluxo de calor e a T_{rm} , o uso do condicionamento térmico em um dia típico de inverno seria dispensável, pois os modelos sem o condicionamento térmico e com o isolamento térmico na parede (CIP 25 + SC, CIP 50 + SC e CIP 75 + SC) tiveram um fluxo de calor semelhante aos modelos com isolamento térmico e condicionamento térmico (CIP + CC). Além disso, as temperaturas radiantes foram superiores nos modelos sem o condicionamento térmico.

4.2.5 Temperatura da Superfície do Piso dos Modelos em um Dia Típico de Verão

O Gráfico 24 apresenta as temperaturas da superfície do piso dos modelos sem o condicionamento térmico durante um dia típico de verão (1 de janeiro).

Gráfico 24 - Temperatura da superfície do piso nos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nesse dia, é possível notar que as temperaturas da superfície dos quatro modelos simulados variaram entre 29,7 °C a 33,9 °C. Essas temperaturas são muito elevadas para o verão, onde o intuito é ter um ambiente com baixas temperaturas na superfície do piso e, conseqüentemente, menores temperaturas do ar.

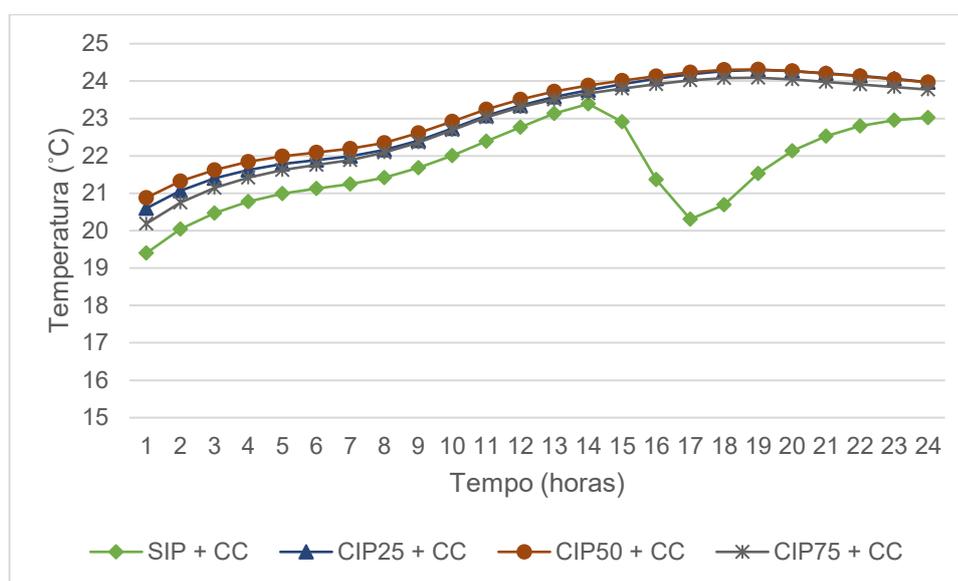
Verificou-se que, assim como ocorreu em relação à temperatura do ar, a temperatura da superfície também elevou-se com o aumento da espessura do isolamento térmico da parede. Contudo, nem mesmo o modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) conseguiu atingir temperaturas agradáveis na superfície do piso, pois elas variaram entre 29,7 °C a 30,7 °C.

A ASHRAE (2016) recomenda que a temperatura da superfície do piso não deve ser inferior à 19°C para resfriar o ambiente e garantir o conforto térmico dos usuários, porém, as temperaturas dos modelos sem o condicionamento térmico (SC)

ficaram próximas às temperaturas recomendadas para o aquecimento do ambiente. Portanto, no verão, somente a presença do isolamento térmico na parede não trouxe resultados satisfatórios para o resfriamento do ambiente, sendo necessário utilizar o resfriamento do piso.

O Gráfico 25 apresenta o resultado dos modelos simulados com o uso do resfriamento do piso.

Gráfico 25 - Temperatura da superfície do piso nos modelos com condicionamento térmico em um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 25 pode-se observar que o condicionamento térmico (CC) reduziu as temperaturas da superfície do piso em comparação com o Gráfico 24. Enquanto os modelos sem o condicionamento térmico (SC) alcançaram temperaturas da superfície entre 29,7 °C a 33,9 °C, com o condicionamento térmico essa variação reduziu para 19,4 °C a 24,3 °C. Esses resultados estão dentro do limite estipulado pela ASHRAE (2016), ou seja, as temperaturas estão acima de 19 °C. Porém, estariam um pouco abaixo do recomendado pela EN 15377-1 (2008) para usuários sedentários, visto que a norma recomenda uma temperatura superior à 20°C. No entanto, para usuários não sedentários as temperaturas da superfície estão dentro do limite estipulado pela EN 15377-1 (2008), ou seja, superior à 18°C.

O trabalho realizado por Zhou *et al.* (2019) mostrou que o tempo de exposição ao resfriamento do piso radiante afetou significativamente a percepção de conforto

térmico dos sujeitos e a resposta à temperatura da pele. De acordo com o estudo, a temperatura da superfície do piso para uma exposição de 2 horas deve ser maior que 18,5 °C e para uma exposição de 8 horas deve ser maior que 20,5 °C. Logo, as temperaturas de Zhou *et al.* (2019) estão muito próximas ao recomendado pelas normas e às temperaturas encontradas nas simulações desse trabalho.

Nota-se também que as temperaturas da superfície dos modelos com o isolamento térmico na parede (CIP) não tiveram uma variação significativa, pelo contrário, a variação entre os modelos CIP25 + CC, CIP50 + CC e CIP75 + CC foi inferior a 1°C. Por outro lado, o modelo sem o isolamento térmico na parede (SIP) atingiu temperaturas menores que os modelos com o isolamento térmico (CIP), visto que a presença do isolamento térmico dificulta o resfriamento do ambiente, criando uma barreira para impedir que o calor saia para o ambiente externo.

Um dos motivos dos modelos sem o condicionamento térmico estarem com a temperatura da superfície do piso tão elevada é pelo fato de que as esquadrias não possuem nenhum tipo de persiana, fazendo com que a radiação incida diretamente nas duas janelas da sala de estar e aqueça tanto o ambiente quanto o piso. Outro fator que também influencia é a ausência da ventilação natural, o que mantém o ambiente e o piso mais aquecidos.

O trabalho de Staszczuk, Wojciech e Kuczynski (2017) mostrou que o isolamento térmico no piso durante dias quentes pode afetar negativamente, aumentando a temperatura do ar no interior do ambiente em até 3,9 °C. Por isso, eles consideraram que pisos sem isolamento térmico é uma opção muito promissora para reduzir o estresse causado pelo calor no verão. No entanto, o modelo com isolamento térmico obteve uma economia de energia anual superior ao modelo sem o isolamento térmico no piso. Assim como o modelo desse trabalho, o modelo estudado por eles também considerou que as paredes possuíam isolamento térmico.

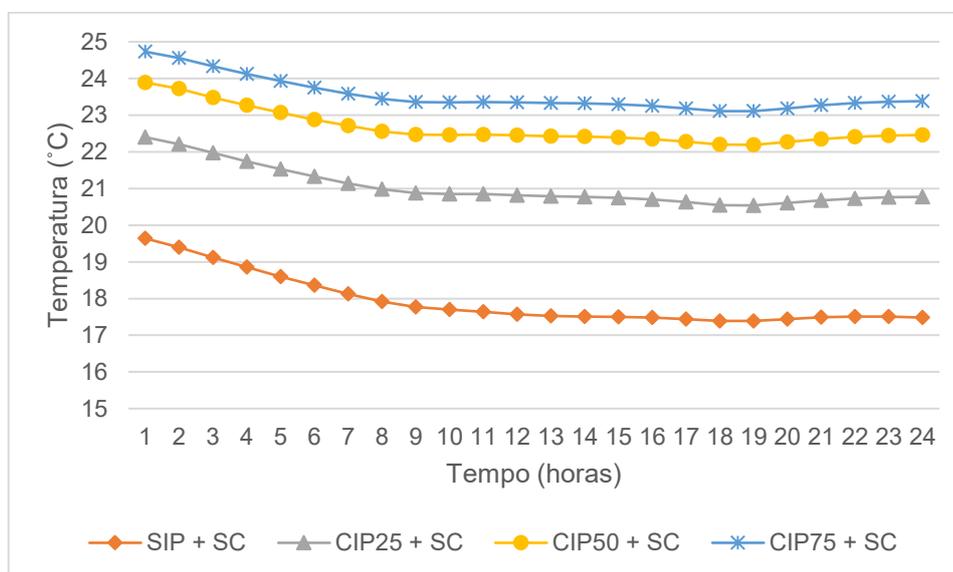
Então, se o modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) não tivesse isolamento térmico no piso, a tendência seria que as temperaturas da superfície e do ar no interior do ambiente fossem menores, mas com um gasto de energia superior. Por fim, a presença do isolamento térmico na parede não influenciou de maneira positiva na temperatura da superfície do piso em um dia típico de verão pelo fato do isolamento impedir a saída do calor, fazendo com que o ambiente ficasse mais aquecido.

Portanto, nesse caso seria necessária a utilização do resfriamento do piso durante um dia típico de verão para reduzir a temperatura da superfície e manter temperaturas confortáveis durante o verão.

4.2.6 Temperatura da Superfície do Piso dos Modelos em um Dia Típico de Inverno

A análise da temperatura da superfície do piso dos modelos sem condicionamento térmico também foi realizada para um dia típico de inverno (21 de junho), como mostra o Gráfico 26.

Gráfico 26 - Temperatura da superfície do piso nos modelos sem condicionamento térmico em um dia típico de inverno



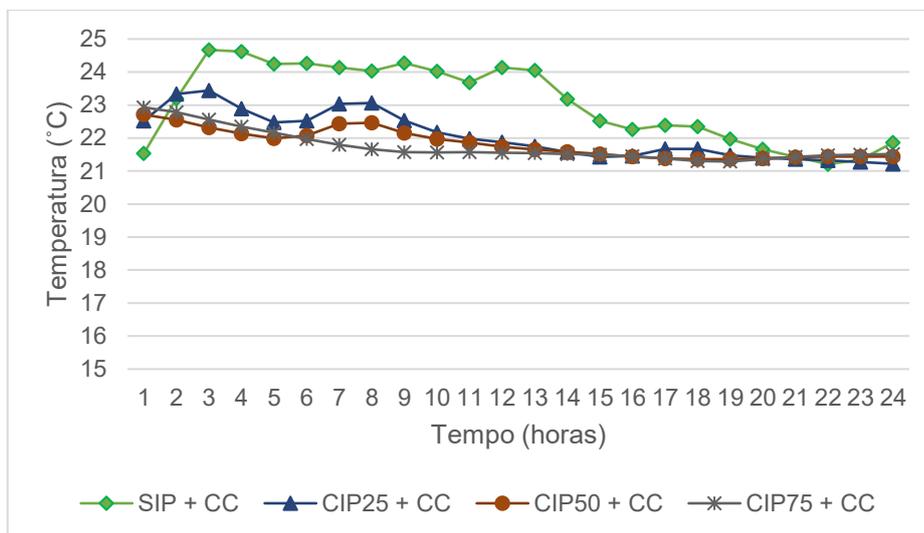
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em análise ao Gráfico 26, verificou-se que as temperaturas da superfície do piso aumentaram à medida em que se elevou a espessura do isolamento térmico da parede. O modelo sem o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (SIP + SC) manteve temperaturas menores em comparação aos modelos com o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (CIP + SC) porque o isolamento térmico, que possui uma baixa condutividade térmica, diminuiu a taxa de transferência de calor por condução, minimizando a perda de calor. Deste modo, as paredes com isolamento térmico favoreceram o conforto térmico da sala, elevando as temperaturas da superfície do piso e mantendo o ambiente mais aquecido.

As temperaturas da superfície do piso nos modelos com o isolamento térmico na parede e sem o condicionamento térmico (CIP + SC) estão dentro do limite

estipulado pela ASHRAE (2016) para o aquecimento do ambiente, ou seja, as temperaturas não excederam os 28 °C. Ainda assim, realizou-se as simulações dos modelos SIP, CIP25, CIP50 e CIP75 com condicionamento térmico (CC) para identificar a temperatura da superfície, como mostra o Gráfico 27.

Gráfico 27 - Temperatura da superfície do piso nos modelos com condicionamento térmico



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 27 observa-se que o modelo SIP + CC foi o que apresentou maior variação de temperatura, com $\Delta T = 3,5$ °C. Em relação aos modelos com isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (CIP25 + CC, CIP50 + CC e CIP75 + CC), quanto maior o isolamento térmico, menor o ΔT . Logo, o modelo com 25 mm de EPS na parede (CIP25 + CC) foi o que apresentou maior variação ($\Delta T = 2,2$ °C).

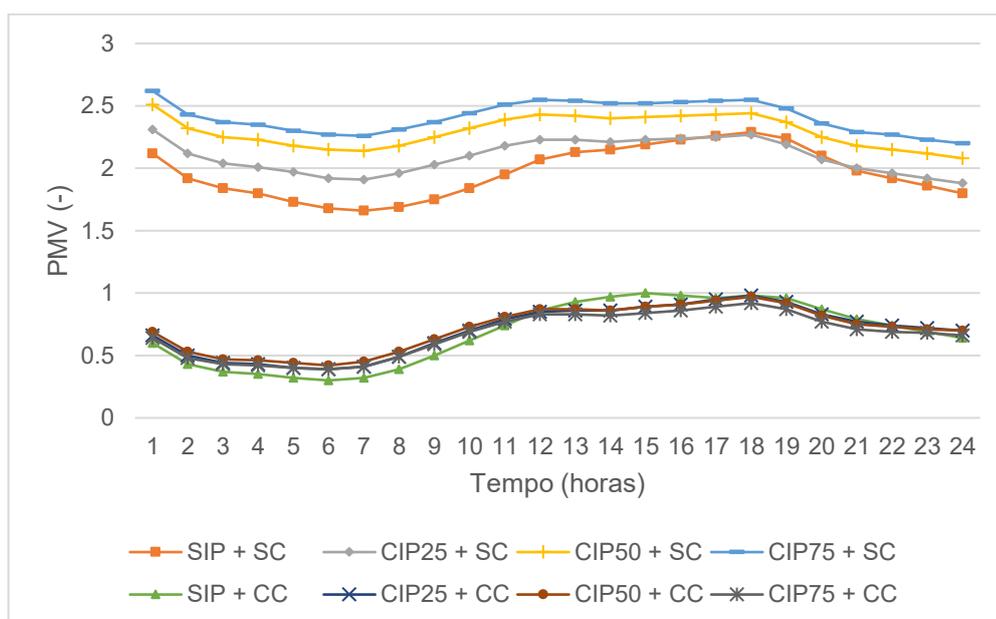
Se comparado os resultados dos modelos sem condicionamento térmico, ilustrados no Gráfico 26, com os resultados apresentados no Gráfico 27, nota-se que o modelo sem isolamento térmico na parede e sem condicionamento térmico (SIP + SC) obteve temperaturas da superfície mais baixas devido à falta de condicionamento térmico e isolamento térmico na parede, fazendo com que houvesse uma perda maior de calor para o ambiente externo, reduzindo a temperatura do ar e, conseqüentemente, a temperatura da superfície do piso. Em virtude disso, o modelo sem isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (SIP + CC) atingiu temperaturas maiores com a presença do condicionamento térmico, fazendo com que o aquecimento do piso fosse acionado quando a temperatura do ar estivesse em até 20 °C.

Muitos trabalhos que realizaram o aquecimento do piso mostraram temperaturas da superfície próximas à 28 °C, como é o caso do trabalho de Shin *et al.* (2015). Entretanto, é importante salientar que muitos desses estudos são referentes à países com temperaturas muito mais baixas que o Brasil, como por exemplo, na Coreia e Europa, onde as temperaturas no inverno são negativas. Por isso, no Brasil, não é incomum que a temperatura da superfície do piso seja um pouco inferior comparado com estudos de outros países.

4.2.7 PMV dos Modelos em um Dia Típico de Verão

Os resultados em relação ao PMV em um dia típico de verão (1 de janeiro) estão apresentados no Gráfico 28.

Gráfico 28 - PMV durante um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Como pôde-se observar no Gráfico 28, os modelos sem o condicionamento térmico (SC) obtiveram um PMV superior aos modelos com o condicionamento térmico (CC). Além disso, a presença do isolamento térmico na parede influenciou no aumento do PMV dos modelos sem o condicionamento térmico (SC), uma vez que à medida em que se aumentou a espessura do isolamento térmico da parede, houve também um aumento no PMV. Essa relação indica que, no verão, os modelos SC atingiram um PMV de até 2,62, o que representa uma sensação térmica de um ambiente muito quente.

Esses resultados já eram esperados, pois as Seções anteriores mostraram que a temperatura do ar e da superfície ficaram bem elevadas, acima do considerado “confortável” em um dia típico de verão nos modelos sem condicionamento térmico (SC). Além do mais, a radiação solar incidente contribuiu para o desconforto térmico, uma vez que elas foram muito superiores no verão em comparação ao inverno. Contudo, cabe ressaltar que em um ambiente real as pessoas abririam as janelas em um dia típico de verão, utilizariam roupas mais confortáveis para a estação e utilizariam formas de reduzir a radiação solar incidente com o uso de persianas ou cortinas. Essas medidas contribuiriam para reduzir as temperaturas interiores e, conseqüentemente, o desconforto térmico.

Ainda assim, o trabalho de Passos (2016), realizado em um modelo também localizado na Zona Bioclimática 2, mostrou que mesmo com ventilação natural e sombreamento nas janelas ainda houve uma maior porcentagem de horas de desconforto por calor. Como há uma alta incidência de desconforto por calor, se torna menos conveniente o ganho de calor do meio externo para o meio interno, principalmente nos períodos mais quentes do ano.

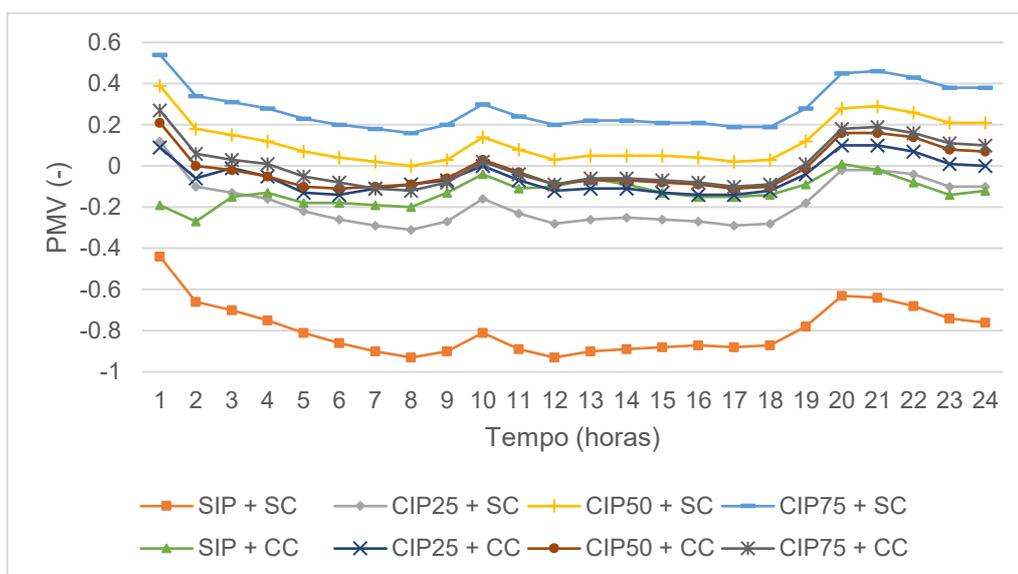
Porém, é importante ressaltar que esses modelos simulados não possuem ventilação e estratégias de sombreamento, que possivelmente reduziriam os valores de PMV. Logo, esse ambiente necessita do condicionamento térmico em um dia típico de verão, ou seja, o resfriamento do piso é essencial na redução do PMV desses modelos.

Como mostra o Gráfico 28, os valores de PMV dos modelos com condicionamento térmico (CC) variaram entre 0,3 e 1, o que representa uma sensação térmica entre neutro e levemente quente. Assim como na análise das temperaturas do ar e da superfície, a camada de isolamento térmico na parede não teve uma influência significativa em relação aos valores do PMV dos modelos com o condicionamento térmico (CC), visto que houve uma variação muito pequena.

4.2.8 PMV dos Modelos em um Dia Típico de Inverno

O Gráfico 29 apresenta o PMV dos modelos com e sem o condicionamento térmico durante um dia típico de inverno (21 de junho).

Gráfico 29 - PMV durante um dia típico de inverno



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 29 é possível notar que o PMV teve resultados satisfatórios, ou seja, próximos à zero nos modelos sem o condicionamento térmico e com isolamento térmico na parede (CIP25 + SC, CIP50 + SC e CIP75 + SC).

Como a função do isolamento térmico é não deixar “escapar” o calor de dentro do ambiente para mantê-lo aquecido, somente o uso do isolamento térmico na parede foi suficiente para atingir um PMV entre -0,31 e 0,54. Já o modelo SIP + SC atingiu um PMV menor, entre -0,44 e -0,93, devido à ausência do isolamento térmico na parede, o que aumentou a interação do ambiente interno com o externo, fazendo com que o ambiente perdesse mais calor, reduzindo as temperaturas do ar, da superfície e também o PMV, como mostram as Seções 4.2.2 e 4.2.6.

Conforme o esperado, teve-se um aumento no PMV nos modelos sem o condicionamento térmico à medida em que se elevou a espessura do isolamento térmico na parede. Logo, quanto maior o isolamento térmico na parede, maior a sensação de que o ambiente está “quente”.

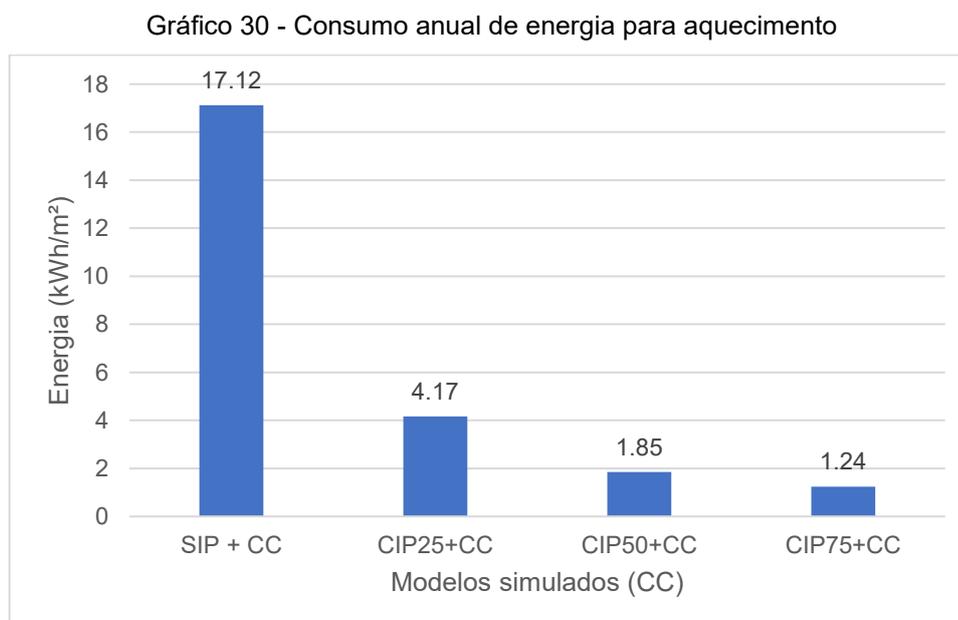
Por outro lado, os modelos com condicionamento térmico (CC) não tiveram uma variação significativa no PMV, como ocorreu nos modelos sem o condicionamento térmico em relação à espessura do isolamento térmico da parede. Ainda assim, consegue-se constatar que o modelo com 75 mm de EPS na parede (CIP75 + CC) obteve um PMV superior aos modelos com 25 mm de EPS (CIP25 + CC) e 50 mm de EPS (CIP50 + CC).

A análise do PMV foi de encontro com o esperado, visto que as temperaturas do ar, da superfície e radiante também se elevaram com o aumento da espessura da camada de isolamento durante um dia típico de inverno.

Como esse estudo não considerou a ventilação natural, possivelmente as temperaturas e, conseqüentemente, o PMV seriam menores se a ventilação fosse considerada.

4.2.9 Análise do Gasto de Energia Anual

O Gráfico 30 mostra o gasto de energia anual em kWh/m² para o aquecimento do ambiente. Os modelos (SC) não foram apresentados pois não possuem condicionamento térmico.



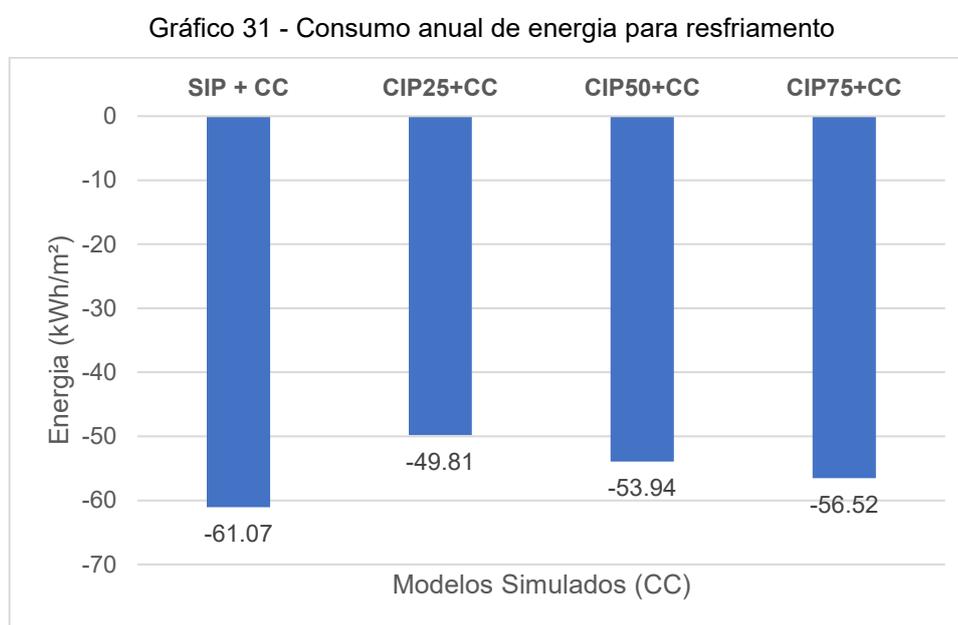
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando os resultados do Gráfico 30, verifica-se que o modelo SIP + CC foi o que consumiu mais energia (17,12 kWh/m²) devido à ausência do isolamento térmico nas paredes. Se comparado com as recomendações da “*Passive House*”, esse modelo estaria um pouco superior ao recomendado, visto que a recomendação é que o consumo não ultrapasse 15 kWh/m². Entretanto, quando se adicionou 25 mm de EPS na parede percebeu-se que esse o consumo de energia diminuiu 75,64 %. Ressaltando que, quanto maior a espessura do isolamento térmico da parede maior a

economia de energia para aquecer o ambiente. Logo, o modelo CIP 75 + CC foi o que obteve maior economia de energia, resultando em uma redução de 92,76 %.

Essa análise é confirmada por Passos (2016), que relatou que em locais frios a utilização de isolamento térmico em toda envoltória se torna favorável, pois impede a perda de calor interno, proporcionando menores condições para a ocorrência de temperaturas mais baixas e reduzindo o consumo energético para aquecimento.

O Gráfico 31 apresenta os resultados referentes ao consumo de energia anual em kWh/m² para o resfriamento do ambiente.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 31 percebe-se que a economia de energia foi menos significativa para o resfriamento do piso. Os modelos com isolamento térmico na parede e com condicionamento térmico (CIP25 + CC, CIP50 + CC e CIP75 + CC) obtiveram uma economia de 18,44%, 11,68% e 7,45%, respectivamente, em comparação ao modelo sem o isolamento térmico na parede e com o condicionamento térmico (SIP + CC). Logo, para resfriar o ambiente, quanto menor o isolamento térmico utilizado na parede, maior a economia de energia, uma vez que o uso do isolamento térmico armazena o calor dentro da sala de estar, impedindo a sua saída, o que dificulta no resfriamento do ambiente. Esses resultados também indicam que o consumo de energia para o resfriamento está muito elevado e não se enquadra nas recomendações das “*Passives Houses*”.

Passos (2016) simulou um modelo semelhante ao modelo sem o isolamento térmico na parede e com o condicionamento térmico (SIP + CC), porém, sem isolamento térmico no piso e verificou que essa configuração foi a que resultou nas piores condições de conforto térmico e de consumo energético. Tal ocorrência se deu devido ao fato de que sob tal envoltória, a residência tornou-se muito vulnerável as condições climáticas externas, que se apresentam de forma extrema, tanto no período mais quente do ano, quanto no mais frio, assim como ocorre na cidade de Passo Fundo.

Logo, o modelo com 25 mm de EPS na parede e com o condicionamento térmico (CIP25 + CC) foi o que obteve maior economia de energia (18,44 %) em comparação ao modelo sem o isolamento térmico na parede e com o condicionamento térmico (SIP + CC). Ainda assim, o uso do isolamento térmico foi benéfico, pois houve uma redução no consumo de energia em comparação ao modelo SIP + CC.

Linczuk (2015), que também simulou um modelo localizado na Zona Bioclimática 2 e variou a espessura do isolamento térmico na parede em 25 mm, 50 mm e 100 mm, concluiu que a espessura de 25 mm foi a que obteve o melhor custo benefício em comparação com as demais.

Essa análise mostra a importância de compreender o funcionamento dos materiais de isolamento. Através do isolamento térmico na parede com EPS conseguiu-se reduzir o consumo de energia, principalmente no inverno. Como esse trabalho tem como foco o aquecimento do piso, o uso do isolamento térmico na parede seria essencial para as pessoas que querem implementar um sistema de calefação durante o inverno em suas residências.

Esse trabalho mostrou uma economia de energia muito significativa com o uso do isolamento térmico. Entretanto, para Passos (2016), um sistema de isolamento em alvenarias não é algo comum de ser utilizado nas construções do Brasil, já que os brasileiros não tem a cultura de utilizar os materiais de isolamento pela questão financeira e pela falta de profissionais qualificados. Por ser uma técnica pouco utilizada em comparação a outros países, o sistema de isolamento térmico na alvenaria pode acarretar em patologias pela falta de mão-de-obra especializada e pela falta de conhecimento desses materiais.

De acordo com Specht *et al.* (2010), é necessário estudar as variáveis que interferem no ambiente construído, como as variáveis climáticas, humanas e arquitetônicas. Através delas é possível encontrar soluções construtivas que

melhoram o desempenho energético das edificações. Contudo, é comum encontrar edificações que adotam soluções construtivas que requerem baixo investimento inicial. Porém, a longo prazo, essas edificações consomem mais energia e, conseqüentemente, possuem custos financeiros maiores do que as edificações mais eficientes energeticamente, que requerem um investimento inicial menor.

4.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Não foram encontradas todas as partes da norma EN 1264. Além disso, foram encontrados somente alguns trechos da EN 15377.

Em relação às entrevistas, esse trabalho considerou somente empresas que trabalham com o sistema de piso radiante hidráulico no Estado do Rio Grande do Sul. Logo, não foram entrevistadas empresas em outros estados. Além disso, o foco das entrevistas foi o sistema de aquecimento de piso, visto que, não foram encontradas empresas que trabalhem com o sistema de resfriamento.

Em relação às simulações, esse trabalho não considerou as trocas de ar, a ventilação natural e as estratégias de sombreamento. Portanto, os resultados apresentam uma ideia da influência do isolamento térmico em um ambiente com aquecimento e resfriamento de piso. Porém, compreende-se que as estratégias de sombreamento e ventilação natural fariam com que os resultados ficassem muito mais próximos da realidade.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho avaliou como o piso radiante hidráulico está sendo inserido no Estado do Rio Grande do Sul no ponto de vista de projeto, execução e controle. Com isso, concluiu-se que as empresas entrevistadas trabalham somente com o aquecimento de piso, apesar da sazonalidade do Estado do RS mostrar um grande potencial para o sistema de resfriamento do piso.

Além do mais, as empresas seguem um “padrão” em relação ao material e espessura da tubulação, à execução do sistema e à forma de controle. Porém, notou-se uma diferença no espaçamento utilizado entre os tubos, na espessura da camada de argamassa, no material e espessura da camada de isolamento. Essas diferenças observadas são preocupantes porque implicam diretamente no desempenho do sistema.

Logo, a falta de uma norma brasileira relacionada ao sistema de piso radiante faz com que as empresas dimensionem, projetem, executem e controlem o sistema de acordo com o que acreditam ou como veem as empresas concorrentes realizando. Por isso, se houvesse uma norma brasileira, como há em outros países, o sistema inserido no Brasil teria uma padronização nos materiais e parâmetros de projetos utilizados, além de testes para verificação do desempenho e medidas para garantir a segurança dos usuários.

Por este motivo, a empresa B se destacou por ser a única empresa entrevistada a utilizar a norma EN 1264, e também por ter um de monitoramento de satisfação dos usuários a fim de melhorar a qualidade do seu serviço e o relacionamento com o cliente.

As entrevistas também mostraram que, apesar das empresas recomendarem o uso do isolamento térmico na parede em conjunto com o piso radiante, algumas residências não o utilizam. Em virtude disso, esse trabalho também avaliou o desempenho do sistema de piso radiante em um ambiente com e sem isolamento térmico na parede.

Logo, concluiu-se que o uso do isolamento térmico na parede foi capaz de reduzir, significativamente, o consumo de energia durante um ano, principalmente no modo de aquecimento. Entretanto, em um dia típico de verão, o uso do isolamento

térmico elevou a temperatura interna do ar, a temperatura da superfície do piso, o PMV e a temperatura radiante. Por isso, durante o verão o isolamento térmico na parede não se mostrou tão eficiente quanto no inverno. Um dos motivos é pelo fato de que esse estudo não considerou a ventilação natural, a abertura das esquadrias e as estratégias de sombreamento, que reduziriam o desconforto térmico causado pelo superaquecimento do ambiente.

Esse estudo também avaliou o condicionamento térmico no piso. Durante um dia típico de verão, o uso do condicionamento térmico foi essencial para que as temperaturas do ar, da superfície e radiantes reduzissem e atingissem um PMV próximo ao neutro. Como relatado anteriormente, somente o uso do isolamento térmico durante um dia típico de verão não foi capaz de garantir um conforto térmico aos usuários, sendo necessário o uso do condicionamento térmico.

Por outro lado, apesar do condicionamento térmico em um dia típico de inverno ter apresentado bons resultados, ou seja, temperaturas do ar, da superfície e radiantes próximas ao esperado, ele não seria imprescindível, visto que os modelos com isolamento térmico na parede e sem condicionamento foram capazes de atingir resultados muito próximos aos modelos com condicionamento térmico.

Como no estado do Rio Grande do Sul é predominante o uso do sistema de aquecimento de piso, conclui-se que o uso do isolamento térmico na parede é imprescindível para reduzir a perda de calor para o exterior durante o inverno, pois além dele manter o ambiente aquecido, também reduz o consumo de energia.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Entrevistar empresas que trabalhem com piso radiante em outros estados do Brasil;
- Analisar o desempenho do sistema considerando a variação de espaçamento (15 a 20 cm) entre os tubos utilizados no estado do Rio Grande do Sul;
- Comparar o impacto na economia de energia do resfriamento em ar condicionados e pisos radiantes hidráulicos;
- Avaliar o desempenho térmico dos dois materiais (poliestireno de alta densidade e manta de polietileno) utilizados pelas empresas como camada de isolamento do piso.

REFERÊNCIAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ALVES, C. A.; DUARTE, D. H. S.; GONÇALVES, F. L. T. Residential buildings' thermal performance and comfort for the elderly under climate changes context in the city of São Paulo, Brazil. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 62–71, 2016.
- ANSUINI, R. *et al.* Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 11, p. 3019–3026, 2011.
- ATZERI, A. *et al.* Comfort and energy performance analysis of different glazing systems coupled with three shading control strategies. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 24, p. 545–558, 2018.
- ASHARE. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, INC, 2017.
- ASHARE. **Handbook-HVAC systems and equipment**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, INC, 2016.
- ATHIENITIS, A. K. Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating. **Solar Energy**, v. 61, n. 5, p. 337–345, 1997.
- BABBIE, E. **The Basics of Social Research**. 7. ed. Belmont, Ca: Cengage Learning, 2017.
- BABIAK, J.; OLESEN, B. W.; PETRAS, D. **Low temperature heating and high temperature cooling: embedded water-based surface heating and cooling systems**. Brussels: Rehva, 2009.
- BEAN, R. *et al.* Part 1. History of Radiant Heating & Cooling Systems. **ASHRAE Journal**. Atlanta, p. 40-47. jan. 2010.
- BEHRENDT, B. *et al.* **A System for the comparison of tools for simulation of water-based radiant heating and cooling system**. Building simulation conference. Sydney. 2011.
- BOCKELMANN, Franziska; PLESSER, Stefan; SOLDATY, Hanna. Advanced System Design And Operation Of GEOTABS Buildings. Brussels: Rehva, 2013. 91 p. (20).
- BOJIĆ, M.; CVETKOVIĆ, D.; BOJIĆ, L. Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources. **Applied Energy**,

v. 138, p. 404–413, 2015.

BONI, V.; QUARESMA, S. J. Aprendendo a entrevistar: como fazer entrevistas em Ciências Sociais. **Em Tese: Revista Eletrônica dos Pós-Graduandos em Sociologia Política da UFSC**, v. 2, n. 1 (3), janeiro-julho, 2005, p. 68-80.

BOZKIR, O.; CANBAZOĞLU, S. Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 6, p. 579–586, 2004.

BRAGER, G.; ZHANG, H.; ARENS, E. Evolving opportunities for providing thermal comfort. **Building Research & Information**, v. 43, n. 3, p. 274–287, 2015.

BROILO **AQUECIMENTO. Piso radiante**. Disponível em: <<https://broilo.com.br/produto/8>>. Acesso em: 22 fev. 2020.

CALERO, M. *et al.* Energy consumption reduction proposals for thermal systems in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 175, p. 121–130, 2018.

CAUSONE, F. *et al.* Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 12, p. 2338–2352, 2010.

CBCS (Conselho Brasileiro de Construção Sustentável); MMA (Ministério do Meio Ambiente), PNUMA (Programa das Nações Unidas Para O Meio Ambiente). **Aspectos da construção sustentável no Brasil e promoção de políticas públicas: subsídios para a promoção da construção civil sustentável**. Subsídios para a Promoção da Construção Civil Sustentável. 2014.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de calor e massa**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2012. Tradução de Fátima Lino.

CHEUNG, P. K.; JIM, C. Y. Impacts of air conditioning on air quality in tiny homes in Hong Kong. **Science of The Total Environment**, v. 684, p. 434–444, 2019.

CHO, S. H.; ZAHEER-UDDIN, M. Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 8, p. 1333–1342, 2003.

CHUA, K. J. *et al.* Achieving better energy-efficient air conditioning – A review of technologies and strategies. **Applied Energy**, v. 104, p. 87–104, 2013.

CHVATAL, Karin Maria Soares. **Relação entre o nível de isolamento térmico da envolvente dos edifícios e o potencial de sobreaquecimento no verão**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2007. CIBSE-Chartered Institution of building services engineers. **Heating**. Londres: Ed Palmer, 2016. 170 p.

CRAWLEY, D. B. *et al.* Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661–673, 2008.

CVETKOVIĆ, D.; BOJIĆ, M. Optimization of thermal insulation of a house heated by using radiant panels. **Energy and Buildings**, v. 85, p. 329–336, 2014.

DALBEM, Renata *et al.* Discussão do desempenho da envoltória de uma passive house adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 201-222, mar. 2017.

DRAKE, L. V. **Electric radiant floor heating system**. [S.l.]: Google Patents, 7 nov. 1989.

EMBRAPA. **Clima de Passo Fundo**. Disponível em:<
http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/Clima_de_Passo_Fundo.pdf>
Passo Fundo. 2011. Acesso em: 2020.

EN, EUROPEAN STANDARDS. **EN 1264: Water based surface embedded heating and cooling systems**. European Committee for Standardization, 2009a.

EN, EUROPEAN STANDARDS. **EN 1264-3: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 4: Dimensioning**. European Committee for Standardization, 2009b.

EN, EUROPEAN STANDARDS. **EN 1264-4: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 4: Installation**. European Committee for Standardization, 2009c.

EN, EUROPEAN STANDARDS. **EN 15377-1: Heating systems in buildings - Design of embedded water based surface heating and cooling systems - Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity**. European Committee for Standardization, 2008.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Ministério de Minas e Energia. Nota técnica EPE 30/2018. 43p. 2018. Acesso em: 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional**. Ministério de Minas e Energia. 292p. 2019. Acesso em: 2020.

FEUSTEL, H. E.; STETIU, C. Hydronic radiant cooling — preliminary assessment. **Energy and Buildings**, v. 22, n. 3, p. 193–205, 1995.

FIEDRICH, J. **Radiant floor and wall hydronic heating systems**. US nº 5,579,996, 30 jun. 1992, 03 dez. 1996.

FRANDOLOSO, Marcos Antonio Leite; BIER, Angelica dos Santos; MAZIERO, Bruna; PINTO, Fábio Lamaison; SPADER, Julia de Freitas; MAINARDI, Matheus Scaglia; ALENCARAZEVEDO, Melissa. Avaliação do conforto térmico no edifício v2 da Universidade de Passo Fundo -Brasil. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 5, n. 9, p. 14215-14225, set. 2019.

GIACOMINI. **Sistema de Piso Radiante**. 2017. Disponível em: <https://pt.giacomini.com/>. Acesso em: 15 ago. 2020.

HASSAN, M. A.; ABDELAZIZ, O. Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems – Part II: Simulation, control, and integration. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110263, 2020.

HOLMAN, J. P.. **Transferencia de Calor**. 10. ed. México: McGraw Hiii Book Company, 1999. Tradução de Dr. Raúl Valenzuela M..

HUANG, H. *et al*. Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101840, 2020.

HUANG, L.; ZHAI, Z. (John). Critical review and quantitative evaluation of indoor thermal comfort indices and models incorporating solar radiation effects. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110204, 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População estimada em 2020**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/passos-fundo.html>> Acesso em: 2021.

IEA. International Energy Agency. **Air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth**. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/news/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-demand-growth>>. Acesso em: 2021.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11855: environment design - Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems**. 2018.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva, 2005.

JEONG, Y.-S.; JUNG, H.-K. Thermal Performance Analysis of Reinforced Concrete Floor Structure with Radiant Floor Heating System in Apartment Housing. **Advances**

In Materials Science And Engineering. Goyangdae, p. 1-7. 21 jun. 2015.

JOE, J.; KARAVA, P. A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. **Applied Energy**, v. 245, p.65-77, 2019.

KARMANN, C.; SCHIAVON, S.; BAUMAN, F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review. **Building and Environment**, v. 111, p. 123–131, 2017.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj. M.; BOHN, Mark S.. **Princípios de Transferência de Calor**. 7. ed. São Paulo: Editora Trilha, 2014. Tradução de Noveritis do Brasil.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Conforto e stress térmico**. LabEEE, UFSC, 2016 Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila Conforto Térmico_2016.pdf>

LAMBERTS, R., GHISI, E., ABREU, A., CARLO, J., **Apostila de Desempenho Térmico de Edificações**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

LAOUADI, A. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. **Building and Environment**, v. 39, n. 4, p. 421–431, 2004.

LEACH, M. *et al.* Technical support document: **Strategies for 50% energy savings in large office buildings**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2010.

LINCZUK, Vinícius Cesar Cadena. **Estratégias para melhorar o comportamento térmico de edificações residenciais em regiões de clima temperado no sul do Brasil**. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

LÓPEZ-PÉREZ, L. A.; FLORES-PRIETO, J. J.; RÍOS-ROJAS, C. Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. **Building and Environment**, v. 150, p. 181–194, 2019.

MA, H. *et al.* Investigation on a solar-groundwater heat pump unit associated with radiant floor heating. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 972–977, 2017.

MACHADO, Ana Isabel Organista. **Simulação numérica do comportamento térmico e energético de uma construção modular leve**. 2017. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.

MANZINI, E. J. **Considerações sobre a transcrição de entrevistas**. 2008. Disponível em: <http://www.oneesp.ufscar.br/texto_orientacao_transcricao_entrevista>. Acesso em: 2019.

MIRRAHIMI, S. *et al.* The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot–humid climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1508–1519, 2016.

MUSTAFA OMER, Abdeen. Ground-source heat pumps systems and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 2, p. 344–371, 2008.

NHBC Foundation (org.). **Underfloor heating: a guide for house builders**. 2016. Disponível em: <<https://www.nhbcfoundation.org/publications>> Acesso em: 10 ago. 2020.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M.; S, R. **Adaptive thermal comfort: Principles and practice**. London: Earthscan, 2012. 208 p.

OLESEN, Bjarne. Radiant floor heating in theory and practice. **ASHRAE Journal**. Atlanta, p. 19-24. jul. 2002.

OLESEN, Bjarne. Radiant Floor Cooling Systems. **Ashrae Journal**. Atlanta, p. 16-22. set. 2008.

OLESEN, B. W. Thermo active building systems using building mass to heat and cool. **ASHRAE Journal**, v. 54, n. 2, p. 44–52, 2012.

OLESEN, Bjarne W. **Applications of radiant heating and cooling systems in buildings**. Dinamarca: Technical University Of Denmark, 2016.

OUBENMOH, S. *et al.* Some particular design considerations for optimum utilization of under floor heating systems. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 12, p. 423–432, 2018.

PASSOS, Bruno Aied. **Impacto do uso de isolante térmico em Habitações de Interesse Social nas diferentes condições climáticas brasileiras**. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

RASTELLO, María Carolina. Otimização de parâmetros de projeto de tubulações de sistemas de calefação por piso radiante. 2013. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

REHAU. **Rehau radiant heating system**: Design guide. 2017. Disponível em: <<https://www.rehau.com/download/869560/radiant-heating-systems-design-guide.pdf>>. Acesso em: 2019.

REIS, Pedro. **Vantagens e desvantagens do piso radiante**. 2018. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-piso-radiante-145051/>>. Acesso em: 2019.

RIBEIRO, Luciana Pagnaro. **Conforto e a prática do projeto de edificações: recomendações para Ribeirão Preto**. 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

RHEE, K.-N. *et al.* Simulation study on hydronic balancing to improve individual room control for radiant floor heating system. **Building Services Engineering Research & Technology - BUILD SERV ENG RES TECHNOL**, v. 31, p. 57–73, 12 fev. 2010.

RHEE, K.-N.; OLESEN, B. W.; KIM, K. W. Ten questions about radiant heating and cooling systems. **Building and Environment**, v. 112, p. 367–381, 2017.

RORIZ, Maurício. 2012. Disponível em: <http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Sobre_os_arquivos_EPW.pdf> Acesso em: 2020.

SALVALAI, G.; PFAFFEROTT, J.; SESANA, M. M. Assessing energy and thermal comfort of different low-energy cooling concepts for non-residential buildings. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 332–341, 2013.

SANTOS, Eliane Jorge dos *et al.* A importância do Selo Ruído para equipamentos de ar condicionado. **Revista Técnico Científica do Crea-Pr**, [Curitiba], v. 18, p. 1-21, abr. 2019.

SARBU, Ioan; MIRZA, Matei; CRASMAREANU, Emanuel. **Performance of Radiant Heating Systems of Low-Energy Buildings**. Romênia: Iop Publishing, 2017. v. 245.

SASTRY, Guruprakash; RUMSEY, Peter. VAV vs Radiant. **ASHRAE Journal**. Atlanta, p. 16-24, 2014.

SHELLEN, L. *et al.* The influence of local effects on thermal sensation under non-uniform environmental conditions — Gender differences in thermophysiology, thermal comfort and productivity during convective and radiant cooling. **Physiology & Behavior**, v. 107, n. 2, p. 252–261, 2012.

SEONG, Y.-B. *et al.* Heating Performance and Occupants' Comfort Sensation of Low temperature Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings of Korea. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 14, n. 3, p. 733–740,

2015.

SHIN, M. S. *et al.* Design of radiant floor heating panel in view of floor surface temperatures. **Building and Environment**, v. 92, p. 559–577, 2015.

SHIN, M. S.; RHEE, K.-N.; JUNG, G.-J. Optimal heating start and stop control based on the inferred occupancy schedule in a household with radiant floor heating system. **Energy and Buildings**, v. 209, p. 109737, 2020.

SMITH, Steve; SWEET, Jack. A brief history of radiant heating. **Reeves Journal**. Califórnia, p. 1-2. jan. 2006.

SOBCZYK, W.; E, S. Thermal comfort in a passive solar building. **Earth and Environmental Science**. Polônia: IOP Publishing, v.214, 2019.

SONG, D. *et al.* Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 11, p. 1299–1311, 2008.

SPECHT, Luciano Pivoto; BORGES, Pedro Augusto Pereira; RUPP, Ricardo Forgiarini; VARNIER, Rosane. Análise da transferência de calor em paredes compostas por diferentes materiais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 7-18, dez. 2010.

STASZCZUK, A.; WOJCIECH, M.; KUCZYŃSKI, T. The effect of floor insulation on indoor air temperature and energy consumption of residential buildings in moderate climates. **Energy**, v. 138, p. 139–146, 2017.

STRACHAN, P. A.; KOKOGIANNAKIS, G.; MACDONALD, I. A. History and development of validation with the ESP-r simulation program. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 601–609, 2008.

TEIXEIRA, António Filipe Gonçalves. **Estudo do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico com diferentes acabamentos na superfície**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

THORNTON, B. A. *et al.* **Technical support document: 50% energy savings design technology packages for medium office buildings**. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2009.

TRENELL, John. **Low profile and responsive underfloor heating**: the beama guide to low height, quick response systems for renovation and new buildings. The beama guide to low height, quick response systems for renovation and new buildings. 2017. Disponível em: <<https://www.beama.org.uk/static/uploaded/ff6128ab-1500-427b->

86a93953594043b1.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2020.

VALÉRIO, Jorge Gustavo Marques Alface Pereira. **Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes**. 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

VITAL, Marcos H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **Bndes Set**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p.167-244, set. 2018.

WANG, Y. *et al.* Numerical Simulation of Thermal Performance of Indoor Airflow in Heating Room. **Energy Procedia**, v. 158, p. 3277–3283, 2019.

WIJEWARDANE, S.; JAYASINGHE, M. T. R. Thermal comfort temperature range for factory workers in warm humid tropical climates. **Renewable Energy**, v. 33, n. 9, p. 2057–2063, 2008.

WU, X. *et al.* A new simplified model to calculate surface temperature and heat transfer of radiant floor heating and cooling systems. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 285–293, 2015.

XIE, D. *et al.* Numerical analysis of temperature non-uniformity and cooling capacity for capillary ceiling radiant cooling panel. **Renewable Energy**, v. 87, p. 1154–1161, 2016.

YANG, Yueting. **The role of optimization and simplified methods in the design of Thermally Activated Building Systems (TABS)**. 2013. 47 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Eindhoven University Of Technology, Eindhoven, 2013.

YEO, M.-S.; YANG, I.-H.; KIM, K.-W. Historical changes and recent energy saving potential of residential heating in Korea. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 7, p. 715–727, 2003.

ZARRELLA, A.; DE CARLI, M.; PERETTI, C. Radiant floor cooling coupled with dehumidification systems in residential buildings: A simulation-based analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 254–263, 2014.

ZEILER, W.; BOXEM, G. Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. **Building and Environment**, v. 44, n. 11, p. 2308–2317, 2009.

ZHANG, D.; CAI, N.; WANG, Z. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system. **Energy and Buildings**, v. 61, p. 260–266, 2013.

ZHANG, L. *et al.* Experimental study on heating characteristics and control strategies of ground source heat pump and radiant floor heating system in an office building.

Procedia Engineering, v. 205, p. 4060–4066, 2017.

ZHOU, X. *et al.* Thermal comfort under radiant asymmetries of floor cooling system in 2 h and 8 h exposure durations. **Energy and Buildings**, v. 188–189, p. 98–110, 2019.

ZHOU, G.; HE, J. Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes. **Applied Energy**, v. 138, p. 648–660, 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE A – ROTEIRO DAS ENTREVISTAS

1 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Essa pesquisa está sendo realizada para uma dissertação de mestrado da Imed – Passo Fundo. O objetivo da pesquisa é entender como o sistema de piso radiante hidráulico está sendo inserido no estado do Rio Grande do Sul, visto que há poucos trabalhos brasileiros relacionados a esse tema no Brasil. Essa pesquisa também será realizada com ao menos outras 6 empresas, o que dará um panorama do mercado, aumentando a visibilidade do sistema, facilitando a aceitação das pessoas, já que muitas não conhecem o sistema e as suas vantagens.

A pesquisa será confidencial, ou seja, não serão divulgados seus nomes, a não ser que a empresa assim o deseje (expresso por escrito – email, fotos, etc).

2 - CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

Cidade:

Data de fundação da empresa:

Produtos/serviços vendidos:

Número de funcionários:

Local de maior atuação:

Quantidade de pisos já realizados: (edifícios? m²?)

Quantidade de pisos em projeto, desenvolvimento:

3 - CARACTERIZAÇÃO DO ENTREVISTADO(a)

Cargo:

Idade:

Sexo:

Formação:

3 - ROTEIRO DAS PERGUNTAS

a. Perguntas relacionadas ao projeto do piso:

- A empresa projeta sistema de aquecimento e resfriamento? Ou só um deles?

- Que tipo de tubo (material) é utilizado no sistema?
- Qual o diâmetro dos tubos usualmente utilizado nos projetos? E porquê?
- Qual o espaçamento utilizado entre os tubos? E porquê?
- Qual o comprimento máximo do tubo?
- Você adota/requer uma altura necessária para a instalação do piso? Qual?
- Que tipo de isolante térmico é utilizado no sistema e qual a sua espessura? (se for utilizado)
- Qual a disposição dos tubos? (Formato serpentina, espiral..)
- É utilizado sempre a mesma disposição, ou ela varia de acordo com algum critério?
- Qual o traço da argamassa utilizada? Ou é no concreto?
- É utilizado algum *software* para detalhamento do sistema?
- É utilizado algum *software* para simular o desempenho desse sistema?
- Quais as maiores dificuldades encontradas na elaboração do projeto?
- A carga térmica do recinto é calculada? Isso auxilia no dimensionamento do sistema?

b. Sistema de aquecimento/resfriamento central

- Quais os meios de aquecimento/ resfriamento usualmente utilizados nos sistemas? Por que? (Equipamentos, combustível ou fonte de energia utilizados)
- Como o sistema é dimensionado?

c. Perguntas relacionadas à instalação:

- Qual a forma de instalação? Passo a passo.
- Há algum tipo de revestimento de piso que não é recomendado ser instalado sobre o PRH? Porquê?
- Quais as dificuldades encontradas na execução do PRH?
- Esse sistema é instalado em locais com outros sistemas de resfriamento/ aquecimento? Quando cada um é utilizado?
- Vocês também instalam ventilação mecânica?

- Recomenda o uso de paredes isoladas, janelas que reduzam infiltração, etc?

d. Perguntas relacionadas ao controle:

- Qual a forma de controle do sistema? (Ex. termostatos e atuadores -vazão de água, ou a temperatura da água, ou o intervalo entre as operações, e lógica de controle)
- O controlador é produzido em massa ou é personalizado?
- Controle por zona ou central?
- Há uma interface de controle para o usuário? (painel, app no celular, etc)
- Temperaturas são armazenadas no sistema?
- Qual a temperatura da água usualmente utilizada para o aquecimento/resfriamento?
- Qual o tempo necessário para que o sistema aqueça ou resfrie o ambiente?
- Quais as dificuldades encontradas na implementação do controle?

e. Perguntas relacionadas às normas/manuais:

- Para a realização do projeto, instalação e controle é levado em consideração alguma norma internacional ou manual?
 - Se sim, qual norma é levada em consideração?
 - Como ela é aplicada?
 - Se não, você acha que seria importante ter uma norma específica para pisos radiantes?
- A empresa conhece a ISO 11855, EN-1264, manual da ASHRAE e REHAU? (levar impresso). Se conhece e não usa, por quê?

f. Perguntas relacionadas à mão de obra e materiais:

- Quais os critérios para a seleção dos funcionários que executarão esse sistema?
- A empresa oferece algum treinamento aos funcionários?
- Quais as dificuldades encontradas na seleção da mão de obra?

- Os materiais utilizados são facilmente encontrados na região ou precisam ser importados?
- Se importados, de onde eles são importados?

g. Perguntas relacionadas ao pós-venda

- Quais os problemas comuns de ocorrer (patologias) após a instalação do piso?
- Como deve ser feita a manutenção do sistema?
- Qual a periodicidade das manutenções?
- A empresa oferece assistência aos seus clientes?
- Quais os maiores elogios dos usuários?
- Quais as maiores reclamações dos usuários?
- Qual o consumo típico de energia ao longo do ano?
- Existe um monitoramento de satisfação dos usuários?

h. Perguntas relacionadas aos produtos:

- O piso radiante hidráulico gera algum barulho/ruído?
- A empresa trabalha com algum outro tipo de piso radiante, como o piso radiante elétrico?
- Qual o custo da implementação?
- Quais os materiais mais caros do sistema de piso radiante hidráulico?
- Qual o custo por m² do piso radiante hidráulico e o elétrico?
- Benefícios e desvantagens do elétrico?
- Qual o mais procurado pelos consumidores? Porquê?

Página de assinaturas



Richard Lermen
IMED
Signatário



Francieli Bonsembiante
825.105.800-78
Signatário



Grace Cardoso
312.932.348-18
Signatário

HISTÓRICO

- | | | |
|-------------------------|---|--|
| 11 jun 2021
14:27:26 |  | Pietra Barasuol Hammes criou este documento. (E-mail: pi_hammes@hotmail.com, CPF: 014.218.610-46) |
| 15 jun 2021
15:40:37 |  | Richard Thomas Lermen (Empresa: IMED, E-mail: richard.lermen@imed.edu.br, CPF: 925.065.500-20) visualizou este documento por meio do IP 131.221.13.210 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil. |
| 15 jun 2021
15:40:46 |  | Richard Thomas Lermen (Empresa: IMED, E-mail: richard.lermen@imed.edu.br, CPF: 925.065.500-20) assinou este documento por meio do IP 131.221.13.210 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil. |
| 14 jun 2021
14:44:17 |  | Francieli Tiecher Bonsembiante (E-mail: francieli.bonsembiante@imed.edu.br, CPF: 825.105.800-78) visualizou este documento por meio do IP 186.207.236.110 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil. |
| 14 jun 2021
14:44:17 |  | Francieli Tiecher Bonsembiante (E-mail: francieli.bonsembiante@imed.edu.br, CPF: 825.105.800-78) assinou este documento por meio do IP 186.207.236.110 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil. |
| 11 jun 2021
19:56:17 |  | Grace Tibério Cardoso (E-mail: grace.cardoso@imed.edu.br, CPF: 312.932.348-18) visualizou este documento por meio do IP 177.75.130.28 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil. |
| 11 jun 2021
19:56:50 |  | Grace Tibério Cardoso (E-mail: grace.cardoso@imed.edu.br, CPF: 312.932.348-18) assinou este documento por meio do IP 177.75.130.28 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil. |

Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento

Hash SHA256 do PDF original #26bdac66547731dcd0b5e7e94bcb7cea66dbb817c3cc349447c452c75898358
<https://painel.autentique.com.br/documentos/4ae630eebad554ea50d8871cc80fed13afd19a5d74d94e5dc>

