

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

Mariela Camargo

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DUTOS ENTERRADOS PARA
ARREFECIMENTO DE UMA HABITAÇÃO NA ZONA
BIOCLIMÁTICA 2**

Santa Maria, RS
2017

Mariela Camargo

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DUTOS ENTERRADOS PARA
ARREFECIMENTO DE UMA HABITAÇÃO NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Camargo, Mariela
ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DUTOS ENTERRADOS PARA
ARREFECIMENTO DE UMA HABITAÇÃO NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2 /
Mariela Camargo.- 2017.
105 p.; 30 cm

Orientador: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2017

1. Conforto Térmico 2. Simulação Termoenergética 3.
Arquitetura Bioclimática 4. Ventilação 5. Arrefecimento
Passivo I. Cesar Pizzutti dos Santos, Joaquim II. Título.

Mariela Camargo

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DUTOS ENTERRADOS PARA
ARREFECIMENTO DE UMA HABITAÇÃO NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 31 de agosto de 2017:

Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ísis Portolan dos Santos, Dra. (UFSM)

Eduardo Grala da Cunha, PhD. (UFPeI)

Santa Maria, RS.

DEDICATÓRIA

*À vó Glacy (in memorian), dedico este
e todos os meus grandes momentos.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, agradeço pela confiança na minha capacidade e por acreditar na relevância deste trabalho. Seus conhecimentos não só colaboraram no desenvolvimento da pesquisa, mas me instigaram a buscar sempre mais.

Ao professor, Dr. Eduardo Grala da Cunha, pela mão estendida e pelos ensinamentos compartilhados; agradeço a atenção, a paciência e o incentivo durante todo o processo de dissertação. Encontrei poucas pessoas como o senhor no meu caminho.

Aos professores, Ísis Portolan dos Santos e Marcos Vagheti pela disponibilidade em participar da Banca Examinadora.

Agradeço aos colaboradores da pesquisa, Ricardo Lauxen, Liége Garlet e Larissa Gabe. À equipe do LABCEE-Pelotas, em especial à Renata Dalbem pela ajuda incansável e pelo presente desta amizade.

Aos colegas, Gabriel Queiroz, Eudes Vinicius e Évelyn Paniz por terem sido esses “achados” que o mestrado trouxe para a minha vida. Aos colegas professores e alunos da Unicruz pelo apoio constante.

Às minhas amigas, Patrícia Martins, Juliana Oliveira, Rafaela Gardin, Bárbara Engers, Juliane Marques e Marina Gava, pela torcida fiel e pelo estímulo nos momentos difíceis.

Às famílias Corbellini e Masutti, pela compreensão das visitas que se tornaram escassas, pela acolhida terna e cuidados amorosos que têm comigo.

À minha família, minha maior riqueza, agradeço por tudo. Às minhas irmãs, Mariane e Marcele, pela base sólida que me proporcionam. Igualmente ao meu pai, Mário; aos meus primos, Joãozinho, Luizeane e Aparício; aos tios, João Filimor e Luiz Antônio; às tias Rejane, Angélica e Luciane.

À minha mãe e orientadora de vida, meu exemplo maior de vitória e equilíbrio, Cida Camargo, agradeço pela força e inspiração.

E ao meu marido e melhor amigo, Gustavo Masutti, sem o qual nada teria sido possível; agradeço o amor, a paciência e o empenho em me impulsionar rumo aos meus sonhos. Tu faz parte de todos eles.

A todos que de algum modo desempenharam papel importante na minha vida durante esses dois anos. Gratidão!

***“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes.”***
(Isaac Newton)

RESUMO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DUTOS ENTERRADOS PARA ARREFECIMENTO DE UMA HABITAÇÃO NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2

AUTOR: Mariela Camargo

ORIENTADOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Frente às amplas discussões acerca do desenvolvimento sustentável, da eficiência energética e da arquitetura bioclimática, cada vez mais se fazem necessárias ações que possibilitem a economia de energia na construção civil. Para isso, tem-se investido em estudos para climatização natural, já que esta é uma das grandes demandas de eletricidade do setor residencial. Em meio às novas tecnologias, um método difundido nos anos 1970 vem voltando ao meio científico: são os chamados dutos enterrados ou *earthtubes*, que consistem em trocadores de calor que usam da elevada inércia térmica do solo para resfriar o ar interno das edificações. Mediante essa problemática, o presente estudo buscou investigar o arrefecimento passivo por meio de dutos enterrados em uma edificação hipotética localizada na cidade de Santa Maria – RS, na Zona Bioclimática 02. A análise se desenvolveu em âmbito computacional, por meio de simulações no *software EnergyPlus*, através de três situações distintas para a mesma edificação: Caso-Base A, sem duto enterrado, Caso-Base B, sem duto e com ventilação natural calculada, e Casos-Referência, onde foram combinadas diversas geometrias possíveis de duto enterrado. Para os Casos-Referência, foram testados diferentes diâmetros, comprimentos, profundidades, número de renovações de ar e tipo de cobertura do solo, gerando um total de 216 arranjos. Os resultados foram avaliados a partir do número de graus-hora de resfriamento e do número de horas em conforto, seguindo os conceitos do conforto adaptativo. A partir destes dados, foi possível traçar um diagnóstico comparativo entre as principais variáveis que atuaram sobre os resultados. Dentre os aspectos mais relevantes, observou-se que o aumento do comprimento, da profundidade e do número de renovações de ar por hora. E com a redução do diâmetro e a cobertura desnuda do solo, são propriedades que contribuem para o bom funcionamento do sistema. Portanto, após a avaliação crítica dos resultados, foi possível eleger uma combinação de variáveis de duto enterrado considerada indicada por conta dos altos índices de conforto e do baixo número de graus-hora de resfriamento. A simulação cujas variáveis são: diâmetro de 0,20 m, 50 metros de comprimento, profundidade de aterramento do duto de 3,0 metros, com vinte renovações por hora e com o solo descoberto de vegetação; foi elencada como a situação mais vantajosa. Este arranjo proporcionou para a Zona 1, 94,13% de conforto térmico e 65 graus-hora de resfriamento; para a Zona 2, 94,08% de conforto térmico e 62 graus-hora de resfriamento; e para a Zona 3, 84,23% de conforto térmico e 256 graus-hora de resfriamento. Deste modo, a utilização de dutos enterrados se mostrou eficiente no que tange ao arrefecimento passivo, sendo uma estratégia bioclimática funcional para o clima considerado e, portanto, pode ser melhor explorada pelos profissionais da construção civil.

Palavras-chave: Conforto Térmico. Ventilação. *EnergyPlus*. Estratégias Passivas.

ABSTRACT

ANALYSIS OF PERFORMANCE OF BURIED DUCTS FOR COOLING OF A HOUSING IN BIOCLIMATIC AREA 2

AUTHOR: Mariela Camargo

ADVISER: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

In the face of broad discussions about sustainable development, energy efficiency and bioclimatic architecture, more and more actions are needed to enable energy saving in civil construction. In order to do this, it has invested in studies for natural air conditioning, since this is one of the great demands of electricity of the residential sector. In the midst of new technologies, a widespread method in the 1970s has returned to the scientific milieu: so-called buried ducts or earthtubes, which consist of heat exchangers that use the high thermal inertia of the soil to cool the internal air of buildings. Due to this problem, the present study sought to investigate the passive cooling by pipelines buried in a hypothetical building located in the city of Santa Maria - RS, in the Bioclimatic Zone 02. The analysis was developed in computational scope, through simulations in the EnergyPlus software, through three different situations for the same building: Case-Base A, no buried duct, Case-Base B, no duct and with calculated natural ventilation, and Reference Cases, where several possible buried pipe geometries were combined. For the Reference Cases, different diameters, lengths, depths, number of air renewals and soil cover type were tested, generating a total of 216 arrangements. The results were evaluated from the number of degrees-hours of cooling and the number of hours in comfort, following the concepts of adaptive comfort. From these data, it was possible to draw a comparative diagnosis between the main variables that acted on the results. Among the most relevant aspects, it was observed that the increase in length, depth and number of air renewals per hour. And with the reduction of the diameter and the naked cover of the ground, are properties that contribute to the good operation of the system. Therefore, after the critical evaluation of the results, it was possible to choose a combination of buried duct variables considered indicated due to the high comfort indexes and the low number of degree-hours of cooling. The simulation, whose variables are: diameter of 0.20 m, 50 meters in length, duct ground depth of 3.0 meters, with twenty renovations per hour and with the soil discovered of vegetation; was listed as the most advantageous situation. This arrangement provided for Zone 1, 94.13% thermal comfort and 65 degree-hour cooling; for Zone 2, 94.08% thermal comfort and 62 degree-hour cooling; and for Zone 3, 84.23% thermal comfort and 256 degree-hour cooling. In this way, the use of underground pipelines proved to be efficient in terms of passive cooling, being a bioclimatic strategy that is functional for the climate under consideration and, therefore, can be better explored by construction professionals.

Keywords: Thermal comfort. Ventilation. EnergyPlus. Passive Strategies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tomada de ar externo via duto enterrado	19
Figura 2 – Corte esquemático de sistema de ventilação auxiliado por dutos subterrâneos (energia geotérmica).....	29
Figura 3 – Sistema de dutos enterrados horizontalmente.	30
Figura 4 – Gráfico das médias mensais de temperatura do solo na cidade de Santa Maria/RS.....	32
Figura 5 - Variação do coeficiente de convecção hc com a velocidade do ar.....	34
Figura 6 – Aplicação de dutos enterrados para aquecimento e arrefecimento.	35
Figura 7 – Vista externa da hospedaria.....	39
Figura 8- Entrada do duto enterrado da hospedaria.....	40
Figura 9 – Escadaria helicoidal.	41
Figura 10 – Duto de entrada de ar nos dormitórios.	42
Figura 11 - Vista externa da capela.....	43
Figura 12 – Vista interna do altar da capela com destaque para as entradas de ar.	43
Figura 13 – Entrada externa de ar no duto enterrado.	44
Figura 14- Gráfico Voto Médio Predito x Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas.	47
Figura 15- Intervalos aceitáveis de Temperaturas Operativas para Espaços Condicionados Naturalmente	48
Figura 16 – Carta bioclimática de Givoni.....	49
Figura 17 – Zoneamento bioclimático brasileiro	50
Figura 18 – Carta bioclimática da cidade de Santa Maria.	51
Figura 19 - Representação de graus-hora de resfriamento e aquecimento.....	54
Figura 20 - Interface de modelação do <i>ZoneEarthtube</i> no <i>EnergyPlus</i>	56
Figura 21 – Esquema metodológico	59
Figura 22 - Planta baixa com divisão das Zonas Térmicas	60
Figura 23 – Planta baixa da edificação	61
Figura 24 – Parede de alvenaria utilizada no estudo.	62
Figura 25 – Cobertura utilizada no estudo.	63
Figura 26 – Gráfico de dados climáticos de Santa Maria do ano de 2016.	66
Figura 27 – Edificação modelada no SketchUp pelo <i>plug-in</i> Legacy OpenStudio.	68
Figura 28 – Esquema de variáveis consideradas nos Casos-Referência.	71
Figura 29 – Percentual de horas em conforto e desconforto por calor para o Caso-Base A.	74
Figura 30- Percentual de horas em conforto e desconforto por calor para o Caso-Base B.	75
Figura 31 – Percentuais de horas em conforto para 01 ren/hora.	77
Figura 32 - Graus-hora de resfriamento para 01 ren/hora.....	78
Figura 33 - Percentuais de horas em conforto para 05 ren/hora.	79
Figura 34 - Graus-hora de resfriamento para 05 ren/hora.....	80
Figura 35 - Percentuais de horas em conforto para 10 ren/hora.	81
Figura 36 - Graus-hora de resfriamento para 10 ren/hora.....	82

Figura 37 - Percentuais de horas em conforto para 20 ren/hora.	83
Figura 38 - Graus-hora de resfriamento para 20 ren/hora.	84
Figura 39 – Resumo dos percentuais de conforto para a Zona 1 para o período de dezembro à fevereiro.	85
Figura 40- Resumo dos percentuais de conforto para a Zona 2 para o período de dezembro à fevereiro.	86
Figura 41- Resumo dos percentuais de conforto para a Zona 3 para o período de dezembro à fevereiro.	86
Figura 42 – Análise comparativa entre 01 ren/hora e 20 ren/hora.	88
Figura 43 – Variação do comprimento em relação ao diâmetro.	90
Figura 44 – Variação da profundidade em relação ao comprimento.	91
Figura 45 - Resumo dos graus-hora de resfriamento para as três zonas.	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relatório geral das estratégias para Santa Maria	51
Quadro 2 - Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 2	52
Quadro 3 – Transmitância térmica	52
Quadro 4 - Capacidade térmica de paredes externas.....	52
Quadro 5 - Características do solo no <i>CalcSoilSurfTemp</i>	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Médias mensais de temperatura do solo na cidade de Santa Maria/RS.	31
Tabela 2 – Médias e projeções das temperaturas do solo em janeiro/2014.....	32
Tabela 3 – Temperaturas internas obtidas na capela.	45
Tabela 4 - Especificações de Esquadrias	62
Tabela 5 - Padrão de ocupação para dias de semana e final de semana.....	64
Tabela 6 - Taxas metabólicas para cada atividade	64
Tabela 7 - Padrão de uso de iluminação	65
Tabela 8 - Temperaturas máximas, mínimas e médias obtidas no período entre 1961 e 1990.	67
Tabela 9 – Temperatura médias do solo em °C.	69
Tabela 10 - Variáveis das simulações selecionadas entre os Casos-referência.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Coservação de Energia
ADENE	Agência para a Energia
ADESM	Agência de Desenvolvimento de Santa Maria
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
c	Calor específico
CAD	Computer Aided Design
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
C_T	Capacidade térmica
e	Espessura
EP	EnergyPlus
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPW	EnergyPlus Weather
HIS	Habitação de Interesse Social
IDF	EnergyPlus Input Data File
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Standard Organization
λ	Condutividade térmica
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
M	Metro
NBR	Norma Brasileira
N_v	Taxa de renovação de ar
PBE	Programa de Etiquetagem Brasileira
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
R	Resistência térmica de elementos e componentes
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações
REN	Renovação
R_t	Resistência térmica de superfície a superfície
R_T	Resistência térmica total
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
TM	Taxa metabólica

TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Test Reference Year
U	Transmitância térmica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNICRUZ	Universidade de Cruz Alta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos específicos	21
1.2	JUSTIFICATIVA.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	23
2.2	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA.....	24
2.3	VENTILAÇÃO NATURAL	25
2.3.1	Estratégias de Ventilação Natural	28
2.4	GEOTERMIA E ARREFECIMENTO.....	29
2.4.1	O Uso de Dutos Enterrados	36
2.4.2	O caso de Itaara-RS	38
2.4.2.1	<i>Hospedaria</i>	39
2.4.2.2	<i>Capela</i>	42
2.5	CONFORTO TÉRMICO.....	45
2.5.1	Normas de Conforto Térmico	46
2.5.2	Normas de Desempenho Térmico	49
2.5.2.1	<i>Graus-Hora</i>	53
2.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	54
3	METODOLOGIA	58
3.1	DEFINIÇÃO DO CASO-BASE A.....	59
3.1.1	Geometria da Edificação	61
3.1.2	Características do Envelope	62
3.1.3	Padrão de Ocupação	63
3.1.4	Padrão de Uso de Iluminação e Equipamentos	65
3.1.5	Modelagem e Simulação	66
3.1.6	Temperatura do Solo	68
3.1.7	Infiltração de Ar	69
3.2	DEFINIÇÃO DO CASO-BASE B - <i>AIRFLOWNETWORK</i>	70
3.3	DEFINIÇÃO DOS CASOS-REFERÊNCIA - <i>EARTHTUBES</i>	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	CASO-BASE A	73
4.2	CASO-BASE B	74
4.3	CASOS-REFERÊNCIA.....	76
4.3.1	UMA RENOVAÇÃO POR HORA (01 REN/HORA)	77
4.3.2	CINCO RENOVAÇÕES POR HORA (05 REN/HORA)	79
4.3.3	DEZ RENOVAÇÕES POR HORA (10 REN/HORA)	81
4.3.4	VINTE RENOVAÇÕES POR HORA (20 REN/HORA)	83
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
4.4.1	Conforto Adaptativo	85
4.4.1.1	<i>Variação da cobertura do solo</i>	87
4.4.1.2	<i>Variação das renovações de ar</i>	87
4.4.1.3	<i>Variação do diâmetro do duto</i>	89
4.4.1.4	<i>Variação do comprimento do duto</i>	89
4.4.1.5	<i>Variação da profundidade do duto no solo</i>	90
4.4.2	Graus-hora	91

5	CONCLUSÕES	93
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	APÊNDICES	101

1 INTRODUÇÃO

Os preceitos de desenvolvimento sustentável devem ser inerentes aos projetos realizados pelo setor da construção civil no Brasil. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2014), as edificações correspondem a 48,5% do consumo energético brasileiro, sendo destes, 24,2% encargos do setor residencial. Outro dado apresentado por Lamberts *et al* (2014, p.17) é que “mais recentemente, o ar condicionado começa a participar deste cenário com maior consumo, chegando a 20% na média nacional”.

A construção sustentável deve prever estratégias para melhoria da qualidade da edificação e da eficiência energética. As energias renováveis devem ser aproveitadas, otimizando as fontes não renováveis, das quais o país ainda é muito dependente.

[...] o setor energético produz impactos ambientais em toda sua cadeia de desenvolvimento, desde a captura de recursos naturais básicos para seus processos de produção até seus usos finais por diversos tipos de consumidores. Do ponto de vista global, a energia tem participação significativa nos principais problemas ambientais da atualidade. (ROMÉRO e REIS, 2012, p.7).

Como visto, a climatização artificial tem protagonizado os gastos energéticos no setor residencial. Assim, é necessário que novos métodos sejam explorados na busca de conforto térmico no ambiente construído. Além do ar condicionado que é um método ativo, pois faz uso de energia elétrica para funcionar, existem outros modos de promover a climatização de maneira passiva, ou seja, natural. Uma residência deve obedecer alguns critérios para ser considerada passiva:

Ser adaptada ao clima onde será construída; ter um *layout* cuidadosamente estudado; garantir ventilação natural; utilizar o sol para aquecimento da casa e da água; utilizar isolamento térmico; considerar a massa térmica dos materiais; ter janelas e portas eficientes; apresentar maior conforto ambiental. (GURGEL, 2012, p.20).

É completamente viável garantir o conforto térmico a partir dos itens listados. O surgimento da energia elétrica é recente, no entanto, em tão pouco tempo, desaprendeu-se a técnica de edificar sem a utilização da mesma. A arquitetura também caiu nos moldes de produção em massa da Revolução Industrial. Roméro e Reis (2012) relatam que o ser humano edifica e constrói há cerca de onze milênios,

dos quais apenas nos últimos 130 anos a energia elétrica passou a ser utilizada como fonte de iluminação e, no condicionamento ambiental, nos últimos 110 anos. Em 99% da história das edificações o homem construiu brilhantemente modelos de moradia funcionais de maneira independente à eletricidade. A arquitetura era construída para o conforto, adaptada ao clima. Desde o surgimento da energia elétrica, na segunda década do século XIX, até o início dos anos 1970, houve um verdadeiro “apagão” no tocante à arquitetura bioclimática: foram 140 anos de alienação à eficiência energética.

Em tempos onde não havia outros recursos, a arquitetura vernacular já usava de estratégias inteligentes de aproveitamento dos elementos disponíveis e das características climáticas locais. Proteção contra insolação no verão, amortecimento das variações de temperatura por meio da inércia térmica, ventilação com ar tomado em microclimas favoráveis, aproveitamento solar no inverno, isolamento externo para evitar trocas de calor indesejáveis; são somente alguns dos conceitos utilizados que foram se perdendo com o tempo.

A ventilação passiva é apenas uma das tantas estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas na busca pelo arrefecimento das edificações. Ventilação nada mais é que o processo de renovação do ar em um ambiente fechado, sendo responsável por controlar a pureza e o deslocamento de ar, além de influenciar na temperatura e umidade. Um recurso interessante nesse sentido é o uso de tubos enterrados que se apropriem da inércia térmica do solo para resfriar naturalmente o ar.

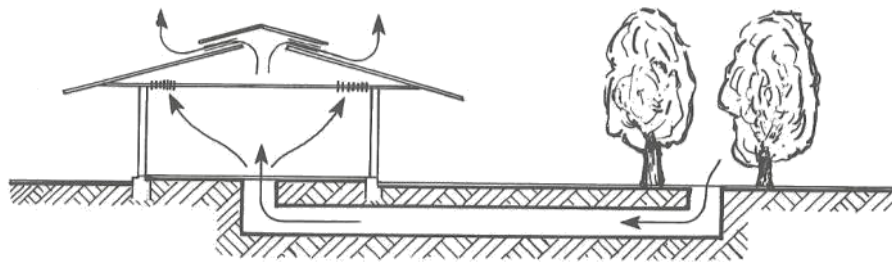
Usados principalmente para auxiliar na refrigeração em um clima quente e árido, os tubos de resfriamento geotérmicos aproveitam as temperaturas estáveis do solo subterrâneo. O ar que está dentro dos tubos é resfriado pela temperatura inferior da terra. (HEYWOOD, 2015, p.126).

Este tipo de método é mais utilizado na América do Norte e na Europa, onde é empregado tanto para arrefecimento quanto para aquecimento. Isso se deve graças à grande inércia térmica do solo em que o mesmo se mantém com a temperatura constante. Ou seja, no verão quando o ar entra quente pelo duto, perde calor para o solo e se resfria, já no inverno, o ar entra a uma temperatura muito baixa e ganha o calor contido no solo. Por se tratar de um país tropical, o Brasil pode valer-se deste recurso para minimizar as variações de temperaturas comuns ao clima, evitando os picos de calor e frio. França (2011) expõe que o preceito chegou a

ser bastante pesquisado nas décadas de 1970 e 1980, mas com o surgimento das novas tecnologias, não teve muita aceitação, ressurgindo, ultimamente, graças à atual tendência do mercado ao desenvolvimento sustentável. Em termos gerais, o sistema prevê que o ar externo, quente, adentre nos condutores subterrâneos e, ao entrar em contato com as paredes deste condutor, perca calor gradativamente à medida que avança em direção ao interior da edificação.

É necessário, além disso, qualificar o ar que entra pelos dutos a fim de melhorar as condições de conforto térmico do ambiente. Dentre as maneiras para promover esta qualificação pode-se citar a umidificação adiabática do ar exterior, a tomada de ar em zonas cujo microclima seja favorável (Figura 01) e a condução do ar em contato com a crosta terrestre nas profundidades onde a temperatura é estável.

Figura 1- Tomada de ar externo via duto enterrado



Fonte: (COSTA, 1982).

Ambientes externos com grandes massas pretas insoladas (ruas asfaltadas, prédios escuros, etc.) podem ter a temperatura bastante aumentada, assim como massas brancas ou zonas permanentemente sombreadas podem ter valor bastante reduzido. Medidas efetuadas em bosques de vegetação cerrada indicaram temperaturas de 3° a 5° C inferiores àquela caracterizada como do exterior à sombra. (COSTA, 1982, p.247).

Outro aspecto interessante acerca deste tipo de sistema é a adaptabilidade perante os mais variados tipos de edifícios, podendo ser instalados no subsolo das edificações, entre as fundações, no pátio, tanto no sentido vertical quanto no horizontal, distribuídos em vários pequenos dutos ou em uma grande tubulação, compostos do mais variados tipos de materiais como pedra, concreto, aço, PVC, entre outros. Além disso, com a crescente procura deste tipo de sistema, prevê-se

que esta tecnologia tenha ainda potencial para sofrer melhorias significativas num futuro próximo.

Nas últimas décadas a aplicação de dutos enterrados, também chamados de permutadores ou trocadores de calor ar-solo, para climatização natural tornou-se um interessante objeto de estudo. Isso se deve ao fato de que o sistema gera resultados notáveis na diferença de temperatura entre ambiente externo e interno, proporciona significativa economia de energia e alia simplicidade de montagem com reduzidos custos de instalação.

Frente à atual crise energética, o condicionamento térmico das edificações tem sido encarado sob novas perspectivas. Os recursos naturais de qualificação ambiental que a natureza dispõe foram sendo paulatinamente esquecidos à medida que as descobertas tecnológicas traziam avanços no setor da construção civil. Acerca disso, Oliveira (2012) acrescenta que a preocupação com os gastos em energia para aumentar os índices de conforto em edificações mal projetadas vem crescendo a tal ponto que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) conta com duas importantes normas publicadas nesta pauta: a NBR 15220 - Desempenho Térmico de Edificações (2005) e a NBR 15575 – Desempenho de Edifícios Habitacionais de até Cinco Pavimentos (publicada em 2008, com a última revisão em 2013).

A sustentabilidade e a eficiência energética, aliadas à arquitetura, são a grande aposta das políticas públicas na busca do amortecimento dos problemas ambientais causados pelo setor, que vão desde o consumo energético à produção de resíduos sólidos. Uma edificação sustentável não contempla apenas as etapas projetuais e executivas das obras, mas sim deve prever todo o planejamento da vida útil do edifício, assegurando a correta utilização dos recursos naturais e o descarte apropriado dos resíduos por parte dos usuários.

Deste modo, pesquisas nesta área se fazem cada vez mais necessárias, pois geram discussões que ajudam a complementar os estudos e despertam interesse dos profissionais no mercado. Estes, por sua vez, são os grandes responsáveis por perpetuar novas técnicas por meio da especificação em projetos e através do contato direto com os clientes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar a influência das variáveis de dutos trocadores de calor ar-solo no arrefecimento passivo de uma habitação localizada em Santa Maria-RS, na Zona Bioclimática 2.

1.1.2 Objetivos específicos

A pesquisa tem como objetivos específicos:

- 1) Definir as variáveis físicas de um duto enterrado propondo diferentes combinações morfológicas;
- 2) Modelar e simular o funcionamento de um duto enterrado para o arrefecimento de uma edificação residencial, com a utilização do programa *EnergyPlus*, tanto para os casos base (sem duto), quanto para diferentes configurações de *EarthTubes*;
- 3) Analisar o desempenho térmico das configurações simuladas através do cálculo do número de graus-hora;
- 4) Avaliar as condições de conforto térmico proporcionadas pelo duto, apontando as configurações físicas de duto mais favoráveis para o arrefecimento passivo no caso analisado.

1.2 JUSTIFICATIVA

O conforto térmico tem sido alvo de constantes discussões e pesquisas no meio científico por conta das atuais mudanças climáticas. Partindo da temática geral de eficiência energética nas edificações e da atual demanda por métodos sustentáveis de qualificação do conforto ambiental, o presente estudo se propõe a analisar uma das estratégias de climatização natural do ambiente construído a fim de promover a redução do consumo de energia. São muitas as indicações de metodologias de aquecimento e arrefecimento dos ambientes, entretanto, a ventilação natural proporcionada por dutos enterrados ainda é pouco explorada, sendo um tema cercado por muitos questionamentos. O tamanho, o número de

tubos enterrados, o material e a sua disposição no terreno são fatores que, geralmente são condicionados por questões orçamentárias, de espaço ou ainda através de análises de modelos.

A partir da bibliografia analisada sobre o assunto, pode-se perceber que não há um procedimento simplificado para estimar a utilização de túneis enterrados como estratégia de arrefecimento passivo nas edificações. A maioria dos trabalhos relativos a essa temática são internacionais e costumam utilizar o sistema para aquecimento do ar interno da edificação. Mediante essas considerações, é possível identificar a necessidade da ampliação de conhecimentos para utilização desse tipo de sistema. Embora sua eficiência seja comprovada, possui utilização ainda tímida nos projetos brasileiros, justamente pelo fato de sua metodologia de utilização envolver um domínio grande de muitas variáveis específicas a cada projeto.

Portanto, torna-se essencial que se obtenham conhecimentos sobre o manuseio dessas estratégias durante o processo de projeto utilizado por arquitetos e engenheiros, aumentando sua aceitação no mercado e subtraindo o gasto de energia elétrica nos sistemas de climatização das edificações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo busca abordar o tema de pesquisa de modo a fornecer respaldo teórico para o desenvolvimento do trabalho. Com o discorrer de cada item pretende-se elucidar a importância da utilização de estratégias bioclimáticas de arrefecimento passivo e qualificar o entendimento do uso do sistema de dutos enterrados enquanto trocadores de calor ar-solo.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Embora se trate de uma das maiores preocupações da atualidade, o desenvolvimento sustentável ainda é um conceito relativamente recente. Desde a Idade Média, o consumo de combustíveis fósseis elevou-se gradativamente, porém sem despertar grandes preocupações no que tange fatores ecológicos. Contudo, além de todas as ideias visionárias que contribuíram para o acelerado avanço tecnológico, a modernidade trouxe, também, uma Revolução Industrial pela qual o mundo não estava ambientalmente preparado, mas isso se perceberia apenas anos mais tarde.

No século XX com o crescimento exponencial das indústrias e, com isso, das cidades e dos transportes, o avanço chegou ao seu limite e uma crise no setor do petróleo balançou a economia mundial. Conforme relatam Roméro e Reis (2012), no dia 17 de outubro de 1973, o preço do barril quadruplicou, indo de US\$ 2,90 para US\$ 11,65 em um período de apenas 90 dias, provocando imediatamente uma crise jamais vista nos setores dos transportes e dos edifícios. Esse crescimento de 300% no valor do petróleo só veio a confirmar aquilo que alguns estudiosos já haviam previsto e vinham debatendo: era necessário gerir novas formas de energia ou a economia entraria em colapso rapidamente.

Foi a partir deste momento que surgiu o primeiro esboço do conceito de desenvolvimento sustentável, prevendo uma transição energética, que abrangeria a substituição de fontes como o carvão, o gás natural e o petróleo por energias renováveis. Os anos seguintes foram de pesquisas e discussões acerca do assunto, através da realização de eventos que geraram relatórios como a Agenda 21, que estabeleceu planos de ação e estratégias que viabilizassem a sustentabilidade ambiental (Keeler e Burke, 2010).

Na década de 1990 iniciaram-se discussões sobre a sustentabilidade na arquitetura, onde algumas conferências foram realizadas, como a Eco'92, por exemplo. Apenas em 1997, com o Protocolo de Quioto, deliberou-se a obrigatoriedade de que os países reduzissem suas emissões dos gases do efeito estufa. Entretanto os Estados Unidos, país responsável pela maior parte da emissão de gases, se recusou a ratificar o acordo. O protocolo entrou em vigor no ano de 2005 e deveria ter todas as metas cumpridas até o ano de 2012, quando uma nova conferência foi feita, prorrogando o prazo até 2020.

Originaram-se, então, planos de ação para reduzir os impactos que as construções provocam no meio ambiente. Isso aconteceu através do gerenciamento de projetos, da reutilização de materiais e de um planejamento bem estruturado de construção, por meio de técnicas e materiais construtivos sustentáveis. Deste modo, ampliou-se a demanda por materiais que não exigissem tanta quantidade de energia em sua fabricação e pela utilização de estratégias naturais – muitas adaptadas de ideias antigas – que aproveitassem os recursos disponíveis na natureza, diminuindo assim os impactos ambientais.

2.2 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

Os efeitos do clima sobre o temperamento e a fisiologia humana são descritos pelos estudos da Bioclimatologia, sendo que a arquitetura bioclimática sempre existiu. Desde que começou a construir, o homem o fez de acordo com o clima e os materiais existentes no seu entorno. Em seu livro “Arquitectura y Clima”, de 1963, Olgay explica não ser coincidência o fato de que grupos de diferentes continentes, crenças e culturas adotavam soluções arquitetônicas similares em climas parecidos.

Bons exemplos de arquitetura bioclimática podem ser encontrados na arquitetura vernácula, considerada melhor adaptada ao clima e mais sustentável. Ao analisar este tipo de arquitetura e suas estratégias é possível perceber que, desde o início da história da moradia, quando o homem inicia o processo de domínio da agricultura e da pecuária e passa a se sedentarizar, as habitações foram construídas conforme o clima e os materiais disponíveis no local, com a grande finalidade de proporcionar proteção das intempéries, dos animais e de grupos rivais.

Em Roma, por exemplo, existiam fornalhas subterrâneas que aqueciam ambientes internos através de vazados nos pisos e paredes, além da reutilização da

água e do uso de cores claras e escuras para refletir ou absorver calor, respectivamente. Em algumas regiões da China e da Tunísia, as edificações ficavam no subsolo devido à capacidade do solo de manter uma temperatura constante, protegendo a população do frio intenso (LAMBERTS *et al*, 2014).

É possível estabelecer diferentes estratégias arquitetônicas em resposta às diferentes regiões climáticas. Os iglus eram feitos com blocos de gelo que funcionavam como um isolante térmico, impedindo que o calor gerado no seu interior se dissipasse para o exterior em um clima frio. Ou, ainda, as edificações no clima quente e seco da Grécia, pintadas de branco para refletir a radiação solar e posicionadas nas encostas próximas ao mar para desfrutar do resfriamento evaporativo.

Desde a Antiguidade o homem procurava maneiras para tornar um ambiente termicamente mais confortável, ao impedir entrada de calor no verão e de frio no inverno. Cada povo tinha suas próprias estratégias e materiais. Com o passar do tempo a tecnologia foi se desenvolvendo, surgiram novas ideias de como expulsar ou manter o calor; surgiram a lareira, a chaminé, entre outros, que começaram a ser comercializados depois da Revolução Industrial.

Sobre a importância de projetar as edificações de acordo com o clima, Mascaró (1991, p.15) refere que “construir com o clima não é mais uma posição ecológica, é uma necessidade quando se analisa o panorama mundial e local da evolução do consumo em relação à disponibilidade de energia”.

2.3 VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação é a movimentação do ar dentro das edificações decorrente da diferença de pressão que, por sua vez, ocorre devido a fatores diversos, como os ventos, as diferentes temperaturas ou densidades. Essa ventilação promove a troca do ar interno, propiciando ambientes salubres, confortáveis, arejados e frescos. A ventilação natural é utilizada como estratégia de conforto térmico há muito tempo, quando os países mais quentes faziam uso das brisas frescas do verão para manter uma temperatura mais amena dentro das edificações. Ainda, fornece oxigênio para a respiração, condicionando um ambiente mais saudável, pois a escassez do mesmo pode causar mal-estar, náuseas, dor de cabeça, distúrbios nas funções motoras e perturbações de comportamento.

Frota e Schiffer (2001) destacam que o primeiro critério de ventilação dos ambientes se baseia nos requisitos básicos de exigências humanas: o suprimento de oxigênio e a concentração máxima de gás carbônico no ar, sendo que a diluição da concentração de gás carbônico requer maiores taxas de ventilação que o suprimento do oxigênio. O vento também leva microrganismos prejudiciais, odores indesejados e gases tóxicos, promovendo a higienização do ambiente. A ventilação auxilia na retirada de impurezas do ar para um ambiente mais saudável.

Concomitante a isso a ventilação também é capaz de resfriar as superfícies internas e externas das edificações ao remover o calor através da convecção. O objetivo fundamental da ventilação é controlar a pureza do ar, auxiliando também no controle da temperatura e umidade de um ambiente (CHIARELLO, 2006). Por se tratar de um recurso natural, gratuito e renovável, o vento pode ser utilizado para ocasionar conforto térmico nas edificações através da redução da umidade do ar e da aceleração da evaporação do suor da pele.

De acordo com Müller (2011), as sensações de conforto higrotérmico, relativo à temperatura e umidade do ambiente, são de ordem fisiológica e psicológica. Os indivíduos não possuem os mesmos critérios de conforto, não se vestem da mesma maneira e se adaptam de formas distintas ao espaço. Nem sempre o equilíbrio homeotérmico entre o ambiente e o organismo humano é indicativo de bem-estar, mas também é influenciado por elementos como temperatura, umidade e deslocamento do ar, através do conceito de temperatura efetiva.

A temperatura efetiva de um ambiente qualquer pode ser definida como aquela que, em um recinto contendo ar praticamente em repouso (velocidades entre 0,1 e 0,15 m/s) e completamente saturado de umidade, proporciona a mesma sensação de frio ou calor que o ambiente em consideração. (COSTA, 2005, p.11).

Frota e Schiffer (2001) apontam que em regiões de clima quente úmido como no Brasil a ventilação natural é a estratégia mais simples para promover o conforto térmico quando a temperatura interna se torna elevada. Existem algumas variáveis que influenciam na ventilação, como a velocidade e ação do vento, a temperatura e a pressão atmosférica. Essas variáveis se transformam conforme a altitude aumenta: a temperatura e a pressão atmosférica diminuem de forma gradual, enquanto a velocidade do vento aumenta em maior escala. A ação do vento

é representada por pressões ou forças, necessárias para que haja movimentação de ar entre o interior e o exterior do edifício. Essas pressões dependem da implantação da edificação, do vento e das aberturas.

A ventilação considerada natural pode ser provocada pela ação dos ventos ou pela diferença de pressão, sendo que esta última é um importante aliado quando determinada região não apresenta incidência permanente de ventos. Quando aquecido, o ar sofre redução em sua massa térmica e é impulsionado no sentido de baixo para cima, na mesma intensidade do peso da massa de ar frio a ser deslocada, gerando uma corrente de ar. Costa (1982) observa que a ação dos ventos pode ser intensificada pela colocação de portas e janelas dispostas convenientemente em paredes opostas e na direção dos ventos dominantes.

As informações sobre o vento, como direção e velocidade, são obtidos através de arquivos climáticos produzidos nas estações meteorológicas. Porém, devido ao fato de que a edificação provavelmente se encontra em uma zona diferente da estação meteorológica, o vento pode ter características diferentes devido à altura e exposição do edifício, à topografia do terreno e objetos vizinhos. Para isso, utilizam-se cálculos baseados em normas e documentos, para aproximar as características do vento à zona em questão.

O fluxo interior do ar depende da temperatura, pois o sentido do movimento das massas de ar é ascendente se a temperatura do ar interior for superior à do ar externo, e descendente quando a temperatura do ar interior é inferior à do ar externo. A velocidade do vento e a temperatura estão diretamente ligadas à pressão, pois o vento provoca pressão positiva na fachada que recebe a ação e negativa nas demais fachadas; e a diferença de temperatura também origina uma variação de pressão, que faz com que haja a troca de massas de ar (SILVA, 2012).

O conhecimento das diferenças de pressões externas é de grande importância e são indicadas por um coeficiente de pressão. Silva (2012, p. 3) explica que, “coeficiente de pressão é uma quantidade adimensional que descreve a pressão relativa através de um campo de fluxo em dinâmica de fluídos”. Pode ser positivo ou negativo, depende se a pressão local for maior ou menor que a pressão atmosférica, e essa diferença, por sua vez, varia com a direção do vento, com a topografia e com os obstáculos vizinhos. O valor do coeficiente é utilizado para saber em qual fachada devem-se posicionar aberturas de admissão e aberturas de expulsão. Quando um fluxo de ar que foi admitido em uma edificação incide sobre

um elemento, seja ele arquitetônico, estrutural ou decorativo, começa a perder sua intensidade devido à mudança de direção, à fricção, à seção do elemento, entre outros fatores. A resistência causada pelos fluxos e alterações das dimensões da seção de escoamento denomina-se coeficiente de descarga. Este coeficiente varia de acordo com a velocidade do vento, com a diferença de temperatura do ar e com a forma da seção.

As massas de ar também podem se movimentar através de buracos e fendas – aberturas não dimensionadas. Segundo Silva (2012), as fendas mais significativas são as que se encontram nos caixilhos das janelas e nas portas exteriores e interiores. A ventilação que ocorre por essas fendas denomina-se infiltração, podendo alterar os fluxos de ar calculados e, assim, influenciar no consumo de energia.

2.3.1 Estratégias de Ventilação Natural

Para que uma edificação possa obter uma boa ventilação natural é necessário tirar vantagem dos recursos disponíveis no local e tomar cuidado com alguns itens. É preciso pensar na forma e na orientação da edificação, bem como no entorno, para orientar janelas às brisas, além de direcionar o ar através da sua forma e da vegetação ao redor, que serve como obstáculo no inverno e direcionador no verão. Quanto ao interior da edificação, devem-se promover espaços fluidos que permitam a circulação do ar, tanto horizontalmente quanto verticalmente, tirando vantagem da tendência que o ar quente tem de subir e o frio de descer.

A ventilação cruzada é uma estratégia que tira partido do posicionamento de aberturas em lados opostos do ambiente, onde as condições de exposição ao vento sejam diferentes, permitindo a entrada de ar fresco e sua circulação completa. A ventilação natural por diferença de temperatura é obtida por meio de entradas de ar próximas ao piso, onde o ar fresco adentra no ambiente; e saídas de ar no teto ou no alto da parede, por onde o ar aquecido sai. Este princípio também é utilizado nas antecâmaras das saídas de emergência. Assim, a fumaça, por ser quente e mais densa, sobe e é evacuada, possibilitando a renovação do ar.

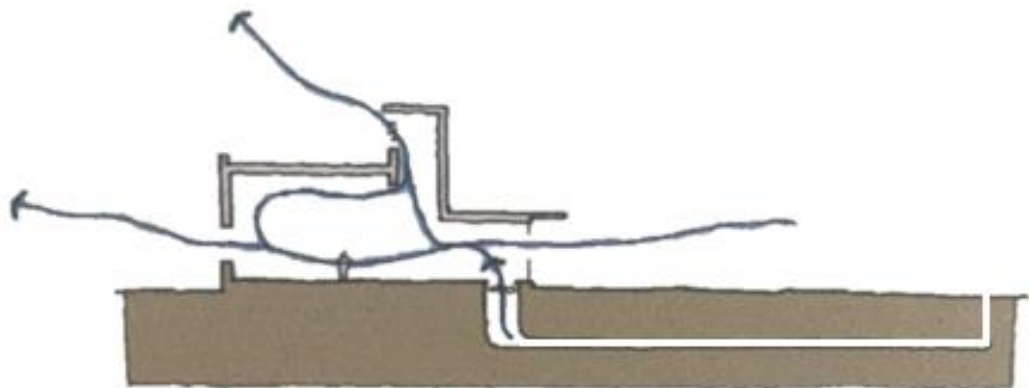
As edificações podem, ainda, serem ventiladas pelo fenômeno do efeito chaminé. No princípio das torres de vento, uma torre posicionada acima da cobertura capta o vento e o conduz para a parte mais baixa do edifício, com aberturas

elevadas para extração do ar quente. A chaminé solar, por sua vez, utiliza uma torre de vidro com captador de cor escura, que tira proveito do sol para aquecer o ar que está dentro do compartimento, produzindo um efeito de sucção do ar interno e forçando a entrada pelas aberturas inferiores.

O resfriamento evaporativo é a estratégia ideal para locais com clima quente e seco. Baseia-se no princípio de que a água retira o calor do vento para evaporar, tornando, assim, o ar mais frio. Embora as soluções mais utilizadas neste âmbito sejam os espelhos d'água e as vegetações, ainda existem as torres evaporativas. Este conceito permite a concepção de uma torre com paredes umedecidas que resfria o ar através da evaporação da água, tornando-o mais denso e fazendo-o descer para o interior da edificação.

A ventilação subterrânea, na qual está ancorada a abordagem principal deste trabalho e é mais detalhada pelo item 2.4, aproveita-se da inércia do solo através de dutos enterrados. Nesta estratégia o ar externo entra nos dutos subterrâneos e é resfriado ou aquecido pelo solo, adentrando assim na edificação (Figura 2). É indicada em climas com grande oscilação térmica. O sistema ganha força quando associado com aberturas que possibilitem um efeito-chaminé.

Figura 2 – Corte esquemático de sistema de ventilação auxiliado por dutos subterrâneos (energia geotérmica).



Fonte: (Adaptado de Heywood, 2015).

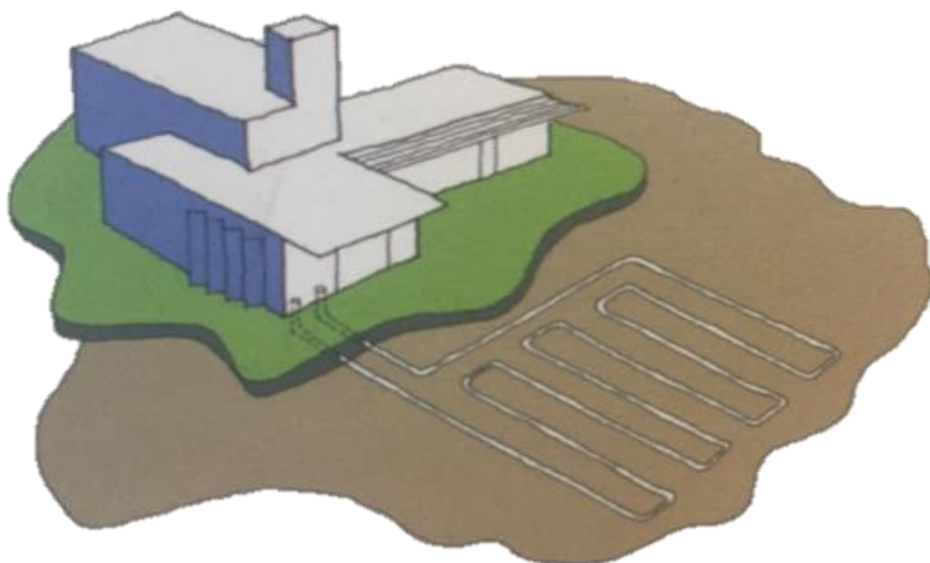
2.4 GEOTERMIA E ARREFECIMENTO

O uso da geotermia superficial de baixa entalpia é um método que tira partido da temperatura do solo, que, segundo Neto e Voltani (2013) possui amplitude térmica de 1°C a 2°C ao longo do ano a partir dos três metros de profundidade.

A percepção científica que; em períodos frios, o subsolo não se mostra com temperaturas tão baixas e, em períodos quentes, o subsolo não se mostra com temperaturas tão altas, ou seja, que o comportamento térmico do solo é mais ameno e estabilizado, se comparado com a variação climática que ocorre no ambiente externo; tem sido uma alternativa para o pré-aquecimento de ambientes, no inverno, e para o resfriamento de ambientes, no verão. (VAZ, 2011, p. 38).

A geotermia aplicada para o condicionamento térmico de edificações consiste em um sistema termodinâmico onde um fluido refrigerador, no caso o ar, circula por dutos enterrados horizontalmente (Figura 3) nas profundidades de três a cinco metros. Uma profundidade muito superficial não é aconselhada, pois sofre maior variação térmica por estar mais suscetível às ações das intempéries externas. Da mesma forma, profundidades de muitos metros não são consideradas viáveis economicamente, uma vez que exigem maior escavação e, conforme os relatos de Sousa (2014), não há grandes variações na temperatura em relação ao aumento gradativo da profundidade.

Figura 3 – Sistema de dutos enterrados horizontalmente.



Fonte: (Heywood, 2015).

Dentro desse raciocínio, Sousa (2014, p.13) explana sobre a capacidade geotérmica do solo: “as variações diárias da temperatura superficial terrestre não se fazem sentir a mais de 0,50 metros de profundidade e as variações sazonais até uma profundidade de aproximadamente três metros”, quando ocorre o princípio de desfasamento entre as camadas.

Ainda sobre a temperatura em relação à profundidade, Longo (2014) retrata por meio da Tabela 1 e da Figura 4 as curvas de distribuição da temperatura do solo. O autor desenvolveu medições de setembro de 2013 a agosto de 2014, em diferentes profundidades em uma área experimental localizada no campus da UFSM, na cidade de Santa Maria- RS, com a finalidade de desenvolver o aproveitamento da energia geotérmica.

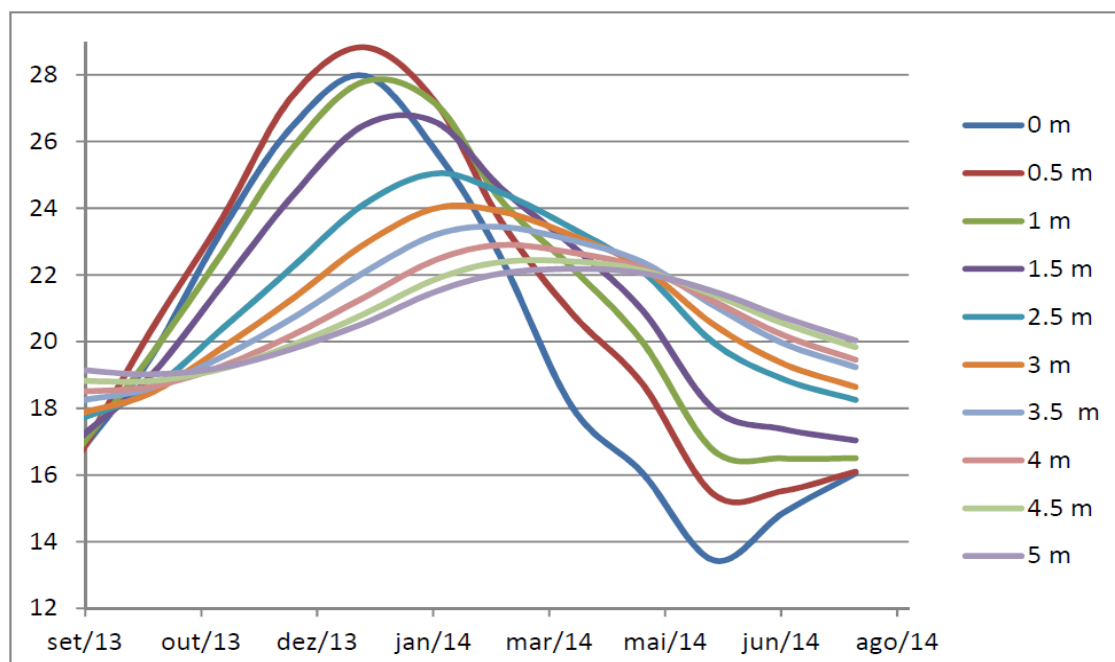
Tabela 1 - Médias mensais de temperatura do solo na cidade de Santa Maria/RS.

Mês	Profundidade - metros									
	0 m	0.5 m	1 m	1.5 m	2.5 m	3 m	3.5 m	4 m	4.5 m	5 m
set/13	16,69	16,64	16,85	17,13	17,68	17,85	18,23	18,50	18,82	19,14
out/13	19,49	20,29	19,56	18,95	18,54	18,45	18,60	18,64	18,81	19,01
nov/13	23,34	23,69	22,64	21,69	20,38	19,81	19,54	19,26	19,18	19,22
dez/13	26,43	27,34	25,77	24,33	22,21	21,26	20,69	20,18	19,89	19,77
jan/14	27,98	28,83	27,79	26,48	24,11	22,90	22,06	21,31	20,82	20,54
fev/14	25,73	27,18	27,13	26,58	25,04	24,00	23,20	22,44	21,87	21,49
mar/14	22,54	23,63	24,26	24,62	24,47	23,90	23,44	22,89	22,38	22,04
abr/14	18,03	20,83	22,20	22,87	23,39	23,18	23,03	22,66	22,40	22,18
mai/14	16,07	18,75	20,01	20,95	22,12	22,23	22,38	22,20	22,14	22,05
jun/14	13,43	15,41	16,72	17,97	19,96	20,50	21,08	21,20	21,40	21,50
jul/14	14,86	15,52	16,49	17,37	18,87	19,33	19,94	20,18	20,54	20,73
ago/14	16,04	16,09	16,50	17,03	18,25	18,64	19,23	19,45	19,83	20,03

Fonte: (Longo, 2014).

A amplitude das variações das temperaturas do subsolo é ilustrada pelo gráfico da Figura 4. É possível perceber que na medida em que se aumenta a profundidade, a amplitude térmica é reduzida, resultando em curvas com menores variações. Os resultados foram obtidos para cada 0,50 m de profundidade, com exceção da profundidade de 2,0 m, onde os termômetros apontaram erro e seus dados foram descartados, sem prejudicar, no entanto, os demais resultados.

Figura 4 – Gráfico das médias mensais de temperatura do solo na cidade de Santa Maria/RS.



Fonte: (Longo, 2014).

Tabela 2 – Médias e projeções das temperaturas do solo em janeiro/2014.

Nº de medidas	Profundidade	Temperatura medida	Temperatura estimada
1	0,5	29,06	30,91323
2	1,0	28,0	28,23216
3	1,5	26,5	26,1809
4	2,0	25,03	24,6115
5	2,5	23,98	23,41077
6	3,0	22,75	22,49209
7	3,5	21,92	21,78922
8	4,0	21,19	21,25147
9	4,5	20,72	20,84003
10	5,0	20,46	20,52525
	5,5		20,28441
	6,0		20,10014
	6,5		19,95916
	7,0		19,8513
	7,5		19,76878
	8,0		19,70564
	8,5		19,65733
	9,0		19,62037
	9,5		19,5921
	10		19,65192

Fonte: (Longo, 2014).

Além dos valores obtidos, Longo (2014) ainda utiliza métodos de regressão linear como o Método dos Mínimos Quadrados para estimar temperaturas em maiores profundidades. O método foi aplicado para o mês de janeiro considerando o número de medições, a profundidade de cada uma delas, a temperatura medida e a temperatura média anual; e comprova o fato de que com o aumento da profundidade, a temperatura se mantém constante, reduzindo cada vez mais a amplitude térmica, como demonstrado na Tabela 2.

O solo tem capacidade calorífica elevada e, quanto mais úmido, maior essa capacidade (MUSSKOPF, 2006). A capacidade calorífica de um material se dá pela quantidade de calor necessário para aquecê-lo 1°C. Devido à inércia térmica apresentada pelos materiais de elevada capacidade calorífica, é possível identificar características que alteram o fluxo térmico nestes materiais. Tais características são: o amortecimento da onda de variação de temperatura; a defasagem da onda de variação periódica da temperatura; a redução da intensidade do fluxo térmico para aquém daquele correspondente a uma resistência térmica de condução pura e a acumulação do calor durante o ciclo positivo e do frio durante o ciclo negativo (COSTA, 1982).

Nos dutos enterrados a relação de transferência de calor se dá entre ar, duto e solo. Conforme relata Vaz (2011) existem variáveis importantes em um sistema de dutos enterrados (*EarthTubes*) a serem consideradas como: as propriedades físicas e térmicas do solo; a velocidade de escoamento do ar nos dutos; o diâmetro e comprimento dos dutos; a profundidade no solo; o tipo de cobertura do solo; a umidade do ar nos dutos; as propriedades do material dos dutos; o afastamento mínimo entre dutos; além do próprio processo de transmissão de calor no solo.

O processo de troca de calor entre o ar e o duto dá-se através do fenômeno da convecção. Essas trocas são ativadas pela velocidade do ar, neste caso, mesmo que provenha de causas naturais, o sistema de transmissão entre ar e superfície deve ser considerado como convecção forçada (Frota e Schiffer, 2001). Incropera (2008) apresenta a equação do fluxo térmico por convecção:

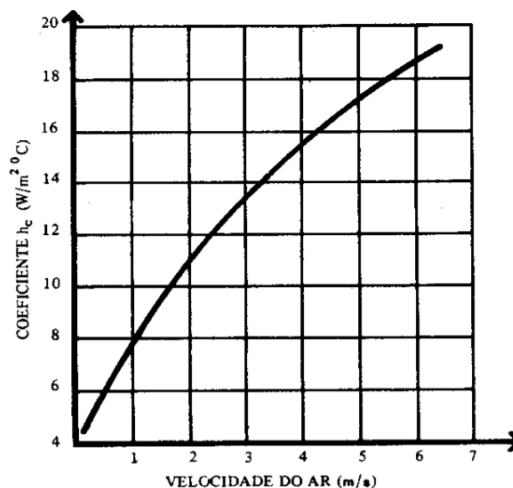
$$Q_{cv} = h_c \cdot S \cdot \Delta t$$

Sendo:

- Q_{cv} = fluxo térmico, por convecção, entre a superfície e o ar (W)
- h_c = Coeficiente de convecção (W/m² °C)
- S = área da placa (m²)
- Δt = diferença entre a temperatura da superfície e a do ar (°C)

Outro dado interessante a ser analisado no gráfico expresso pela Figura 5 é que, quanto maior for a velocidade, maior se torna o coeficiente de convecção. Ou seja, com o aumento da velocidade do ar, aumentam-se as trocas térmicas.

Figura 5 - Variação do coeficiente de convecção h_c com a velocidade do ar.



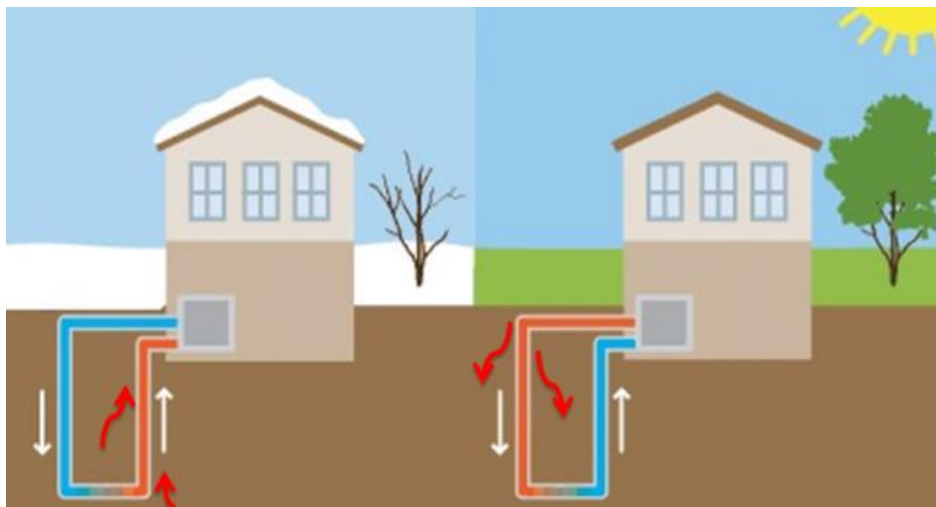
Fonte: (Frota e Schiffer, 2001).

Existem ainda, algumas configurações morfológicas do sistema de dutos enterrados a serem analisadas. Podem, além de dispostos horizontalmente, serem posicionados no sentido vertical (Figura 6), com maiores profundidades. Os também chamados *EarthTubes* podem pertencer a um sistema aberto (Figura 2), onde o ar exterior é condicionado pelo duto e avança no sentido para entrada na edificação; ou a um sistema fechado (Figuras 3 e 6). Neste caso, o ar interno da edificação é forçado a circular pelo duto para sofrer as trocas térmicas e depois é bombeado de volta à própria edificação através da utilização de exaustores elétricos, configurando uma ventilação forçada e não natural.

Sob este aspecto, para o funcionamento do sistema de ventilação através de dutos subterrâneos é necessário prever o posicionamento de saídas que proporcionem a circulação de ar por meio do efeito chaminé. Quando isto não é possível, esta circulação deve ser favorecida através de *coolers* elétricos, uma vez que o ar existente dentro do duto necessita de uma força de sucção para circular. Embora necessitem de energia para funcionar, esses ventiladores mecânicos podem ser projetados para serem eficientes, compondo um sistema híbrido, cujos ganhos no arrefecimento são superiores à sua demanda energética.

Quanto ao número, pode ser previsto um único duto ou uma série de vários dutos, nesta última, entretanto, é necessário observar o distanciamento entre eles de modo a evitar a saturação térmica da camada de solo localizada entre cada duto.

Figura 6 – Aplicação de dutos enterrados para aquecimento e arrefecimento.



Fonte: (Adaptado de Shmurak, 2017).

Como trata Musskopf (2006) o fluido que promove a troca de calor com o solo pode ser tanto a água quanto o ar, sendo a utilização do ar mais comum pelo fato de poder ser utilizado em qualquer situação além de induzir menos perdas do que o sistema com água. Embora a inércia térmica do solo protagonize a eficiência do sistema, o ar é o grande veículo pelo qual as trocas ocorrerão e, para isso, uma boa ventilação é imprescindível.

2.4.1 O Uso de Dutos Enterrados

Embora o sistema de ventilação por dutos enterrados seja um princípio difundido pela arquitetura bioclimática, ainda é tímida a esfera de estudos técnicos que descrevam a influência das variáveis ou critérios para implantação. Os trabalhos desenvolvidos nesse âmbito representam embasamento teórico e denotam avanços em prol de sua aplicabilidade.

Acerca disso, o trabalho de Musskopf (2006) é relevante por conta da proximidade geográfica com a presente pesquisa. O autor investiga a influência da ventilação através de dutos enterrados no “Protótipo Ventura”, uma edificação-modelo construída na cidade de Viamão-RS para o desenvolvimento de pesquisas. O protótipo conta com 45 m² distribuídos em um único pavimento, onde foram analisados dois ambientes: um banheiro e uma sala de administração. Ambos os espaços possuem as mesmas dimensões, 4,5 m²; mas orientações solares distintas. Para o estudo, foram executados dois conjuntos de dutos enterrados, cada conjunto com um tubo de PVC 200 mm e dois tubos de PVC 100 mm, todos com 18 metros de comprimento. As medições ocorreram de outubro de 2005 a março de 2006, no período de verão, visando à comparação da sala de administração (onde foi aplicado o sistema) com o banheiro.

Dentre as considerações mais relevantes trazidas pelo estudo, destaca-se o efeito dinâmico do vento externo. O autor verificou que, quanto maior a velocidade do vento exterior à edificação, maior era também o deslocamento de ar dentro dos tubos, ampliando o processo de trocas térmicas. Quando o vento diminuía a intensidade, a diferença de temperatura entre o ar externo e o ar dos dutos exercia maior influência no fluxo de ar. Com relação ao método de avaliação, Musskopf aponta o critério de graus-hora como um recurso representativo neste tipo de avaliação, bem como os limites de conforto propostos por Givoni.

Também se utilizando do Protótipo Ventura, Vaz (2011) comparou dados experimentais com valores preditos em simulações numéricas, confirmando a viabilidade de procedimentos numéricos. O trabalho também explana sobre o potencial de arrefecimento e aquecimento do sistema; trazendo elucidações sobre a perturbação da temperatura do solo no trecho inicial dos dutos. Informação que reitera a importância da observação de um afastamento mínimo entre tubos quando o sistema contiver mais de um trocador de calor.

Por meio de uma simulação numérica, Rodriguez (2005) utilizou uma formulação clássica proposta para o transporte de calor em meios porosos, onde quatro modelos computacionais de dutos foram analisados. A respeito do comprimento, o estudo demonstrou que as trocas térmicas entre o ar e o solo decrescem exponencialmente ao longo do duto, alcançando um ponto de saturação, que ocorre pela redução da diferença de temperatura entre o ar e o solo. Em relação ao diâmetro, observou-se que em dutos de menor seção, as trocas de calor são mais acentuadas, podendo-se corrigir a perda de eficiência em diâmetros maiores com o aumento do comprimento.

França (2011) realizou simulações com dutos enterrados no programa *EnergyPlus* para ambientes de permanência prolongada de uma edificação residencial localizada em Porto Alegre-RS. Fixando variáveis como profundidade, tipo de solo e material; e alternando características como vazão, diâmetro e comprimento; o autor ressaltou a eficiência do sistema quando direcionado para o arrefecimento. Dentre as propriedades analisadas, a vazão assumiu um papel protagonista: na medida em que se aumentou a vazão, houve uma redução drástica dos graus-hora em desconforto por calor.

Outro estudo de extrema relevância é o apresentado por Sousa (2014) para o clima de Portugal. Através da definição de um modelo com base na ASHRAE 140-2001, o “*Case 900 – Base Case High*” cuja envoltória se assemelha à realidade portuguesa, foram feitas simulações no *EnergyPlus*. Os materiais testados para o duto enterrado foram aço inoxidável, concreto armado e PVC. Para o comprimento foram considerados os valores de 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200 metros. Os diâmetros examinados ficaram compreendidos entre os 0,20 e 1,00 metro, com variações crescentes de 0,10 metros. Por último, as profundidades para o tubo enterrado foram estipuladas entre os 0,50 e os 7,00 metros com variações crescentes de 0,50 metros.

A partir das análises computacionais, concluiu-se não ser aconselhável a utilização de dutos em profundidades inferiores a 1,00 metro ou superiores a 4,5 metros, sendo ideais entre 3,5 e 4,5 metros. Quanto ao comprimento, as maiores variações ocorreram entre os 10 e 75 metros, sendo que comprimentos superiores a este segundo deixam de produzir efeitos significativos. Os diâmetros recomendados foram entre 0,20 e 0,40 metros. A variação entre os três materiais não geraram diferenças suficientemente significativas.

A pesquisa ainda abrangeu uma avaliação econômica visando o tempo de retorno do investimento inicial em quatro cidades-referência de Portugal, sendo de: 5 anos e 10 meses em Bragança; 14 anos e 1 mês em Évora; 20 anos e 10 meses em Lisboa; e 13 anos e 5 meses na cidade do Porto. Portanto, mesmo nos tempos mais elevados, o investimento continua sendo vantajoso, considerando que a vida útil residencial gira em torno de 50 anos. Para tanto, este tipo de sistema que utiliza da geotermia do solo para condicionamento térmico pode ser combinado com outras estratégias, formando um sistema híbrido e ampliando esses rendimentos.

Lee e Strand (2006) analisaram os algoritmos implementados pelo *EnergyPlus* a fim de diagnosticar o desempenho de um tubo enterrado para as cidades norte-americanas de Key West, Peoria, Phoenix e Spokane. O aumento da profundidade e do comprimento, bem como a redução do diâmetro são características inerentes ao bom funcionamento do sistema. Norteados pelas diferenças dos resultados entre as cidades analisadas os autores evidenciam o papel que a observância das particularidades climáticas da região; principalmente as imediatamente próximas, como as propriedades do solo e as condições meteorológicas; exercem neste tipo de simulação.

2.4.2 O caso de Itaara-RS

Por se tratar de uma pesquisa aplicada em edificações construídas e que, deste modo, envolve uma série de variáveis reais como especificidades do clima, características da edificação e propriedades do solo, considerou-se fundamental a observação de duas edificações reais que já possuem o sistema de arrefecimento passivo através de dutos enterrados. Edificações estas que, inclusive, foram motivadoras da pesquisa.

Trata-se de uma hospedaria e de uma capela, ambas localizadas em uma propriedade rural na cidade de Itaara, que por sua vez situa-se na mesorregião do Centro Ocidental Rio-Grandense e na microrregião de Santa Maria, afastada 295 km da capital gaúcha. A cidade fundada em 1997 possui área territorial de 172,4 Km², altitude média de 425 metros do nível do mar e faz divisão ao sul com Santa Maria, cidade base para este estudo e também localizada na Zona Bioclimática 2.

2.4.2.1 Hospedaria

A primeira edificação analisada possui 1.192 m² divididos em quatro pavimentos. Foi construída em 2003 e seu uso é definido como hospedaria, uma vez que conta com 14 suítes que podem ser alugadas por grandes grupos que desejam realizar eventos, cerimônias, encontros de família e etc.

A hospedaria foi projetada com alguns cuidados de controle de qualidade do conforto ambiental, como esquadrias de vidro duplo, paredes duplas com camada de ar isolada, telhas de biaxa absorvência, abertura zenital para facilitar o efeito chaminé, além do duto enterrado de 25 metros de comprimento e dois metros de diâmetro, revestido internamente por pedra basalto.

Tudo foi construído através de conhecimentos empíricos dos idealizadores do projeto. Desde o início havia a intenção de que o conforto térmico fosse priorizado, embora a escolha e dimensionamento dos materiais não tenham seguido nenhum estudo teórico ou científico.

Figura 7 – Vista externa da hospedaria.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2015).

Um dos recursos utilizados para garantir seu funcionamento, já que o sistema não baseou-se em cálculos apropriados, foi garantir que o ar já entrasse qualificado termicamente no duto. Para isso, sua tomada de ar foi estrategicamente posicionada para os fundos do terreno (Figura 8), cercada por uma vegetação maciça de árvores e arbustos.

Figura 8- Entrada do duto enterrado da hospedaria.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2015).

O duto conecta o bosque dos fundos ao centro da hospedaria percorrendo o subsolo da edificação, onde a distribuição do ar é feita através de uma escadaria helicoidal central que liga os quatro pavimentos (Figura 9). Na cobertura, existe uma abertura posicionada exatamente sobre o eixo da escadaria, proporcionando um fluxo de ar pontencializado pelo efeito chaminé. Além disso, do pavimento subsolo por onde o ar do duto adentra a edificação também partem dutos menores que seguem verticalmente entre as paredes, estes por sua vez, proporcionam a condução do ar até os dormitórios (Figura 10).

É interessante salientar que o sistema só funciona nos meses quentes, sendo desativado no inverno através do fechamento da entrada do duto por meio de báculos, afim de evitar a entrada do ar refrigerado na edificação.

Figura 9 – Escadaria helicoidal.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2015).

Figura 10 – Duto de entrada de ar nos dormitórios.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2015).

2.4.2.2 Capela

Alguns metros adiante da hospedaria, encontra-se a capela. Construída em 1985 e com cerca de 36 m², essa pequena edificação também é equipada de um duto subterrâneo. De concreto, o duto possui 35 metros de comprimento, 60 centímetros de diâmetro e sua profundidade é de aproximadamente um metro.

O sistema de ventilação através do túnel subterrâneo funciona da mesma maneira descrita na hospedaria, sua tomada de ar também se encontra localizada em um microclima favorável, sombreado e arborizado. Entretanto, o duto da capela possui maior dimensão de comprimento e menor dimensão de diâmetro. Diferentemente do outro modelo, este duto atravessa o terreno por baixo do solo, coberto por vegetação rasteira e gramíneas, apresentando uma inclinação negativa à medida que se afasta da capela.

Outra característica interessante a ser identificada é o posicionamento da entrada do ar na edificação. Como é possível observar na Figura 12, sob o altar estão

posicionadas grelhas de madeira por onde o ar proveniente do duto adentra à capela e, de modo a promover a constante circulação, o ar é conduzido para fora através de pequenas aberturas posicionadas no forro. Nesta edificação o sistema permanece aberto durante todas as estações do ano.

Figura 11 - Vista externa da capela.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2016).

Figura 12 – Vista interna do altar da capela com destaque para as entradas de ar.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2016).

Figura 13 – Entrada externa de ar no duto enterrado.



Fonte: (Arquivo pessoal da pesquisadora, 2016).

Com o intuito de buscar maiores entendimentos sobre os efeitos do duto enterrado na capela, foram feitas algumas medições de temperatura em dois dias de verão no mesmo horário. A Tabela 3 mostra as temperaturas obtidas com a medição em quatro pontos: na parte externa da edificação, na entrada de ar no duto (sombreada por árvores – Figura 13), na saída de ar do duto (embaixo do altar) e no interior da capela.

É possível analisar a considerável redução da temperatura principalmente confrontando o ponto de entrada de ar no duto com o ponto onde o ar sai do duto em direção ao interior da edificação depois de percorridos seus 35 metros de extensão, chegando a uma diferença de 5,2°C.

Tabela 3 – Temperaturas internas obtidas na capela.

	TEMPERATURAS	
	Dia 25/02/2016 às 15h	Dia 01/03/2016 às 15h
Entrada do duto	27,8°C	27,7°C
Saída do duto	24,5°C	22,5°C
Interior da edificação	29,7°C	25,4°C
Exterior da edificação	32,8°C	31,5°C

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2016).

2.5 CONFORTO TÉRMICO

Um das maneiras de avaliar o desempenho térmico das edificações é analisar o conforto térmico oferecido aos seus usuários. Para Lamberts *et al* (2014) o conforto ambiental pode ser definido como condições ambientais que permitem ao ser humano sentir bem estar térmico, visual, acústico e antropométrico. O conforto está relacionado à eficiência energética ao utilizar as chamadas estratégias bioclimáticas para aproveitar recursos naturais e dispensar o uso de outras fontes de energia.

As variáveis do conforto térmico podem ser de ordem humana, ambiental ou causas diversas. Lamberts *et al* (2014) expõem que as de ordem humana se relacionam principalmente com a atividade física e a vestimenta. Quanto maior a atividade física, maior o calor gerado pelo corpo, por isso é fundamental que se tenha conhecimento das atividades desenvolvidas em determinado ambiente a fim de projetá-lo de maneira adequada do ponto de vista do conforto térmico. A resistência térmica da roupa também é um fator de grande influência, pois a pele troca calor com a roupa, que também troca calor com o meio. Então, quanto maior a resistência da roupa, menor as trocas de calor com o meio.

Algumas diferenças como o sexo, localização geográfica, idade, entre outros, também podem afetar o conforto térmico. Ainda, há o evento da aclimação, que é uma alteração nas preferências térmicas de uma pessoa que ficou exposta por determinado período a uma condição climática.

Assim mesmo, é dependente do sexo; em geral, as mulheres preferem uma temperatura efetiva um grau mais elevada do que os homens. A idade também desempenha um papel importante nos requisitos térmicos: as

peças com mais de 40 anos preferem, geralmente, uma temperatura um grau mais elevada do que as mais jovens que esta idade. De acordo com a localização geográfica, a aclimação afeta a zona de conforto elevando os requisitos térmicos. (OLGYAY, 1998, p.18).

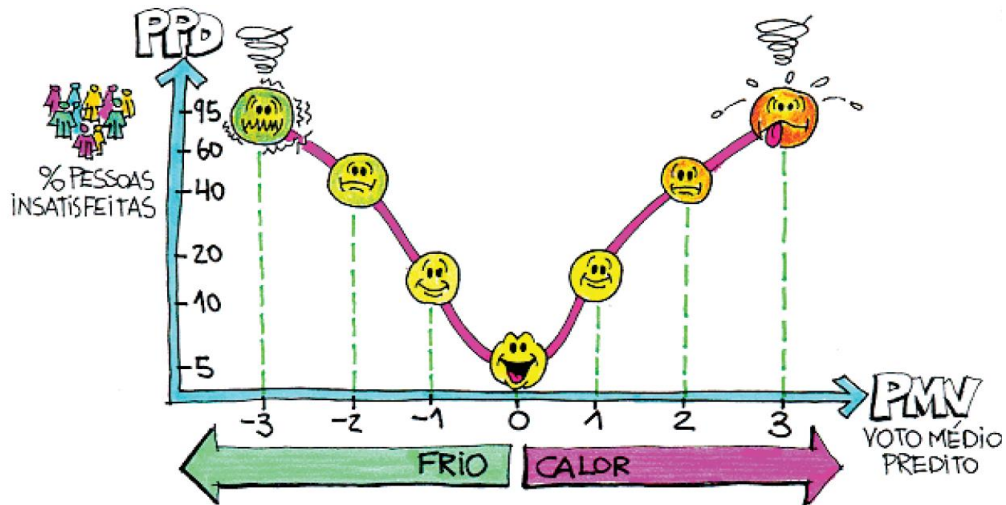
As variáveis ambientais dizem respeito à temperatura do ar. Conforme relatam Corbella e Corner (2011, p.27), “a função do movimento do ar é retirar o ar saturado de umidade na camada superficial da pele e substituí-lo por ar menos saturado, ajudando na troca de calor por convecção e evaporação”. Há também a temperatura radiante, que é a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme. A umidade relativa do ar é a quantidade de vapor de água que o ar contém em relação ao máximo que ele pode reter, e a velocidade do ar que, quanto maior, maior também será a perda de calor, pois modifica as trocas de calor de uma pessoa.

2.5.1 Normas de Conforto Térmico

Quando se trata de conforto térmico existem duas abordagens de pesquisa: a estática, que representa uma avaliação das sensações térmicas considerando o homem um mero receptor passivo do ambiente; e a adaptativa, que considera o homem como um agente ativo, que interage com o meio de acordo com suas preferências.

A partir de um ciclo de estudos em câmaras climatizadas Fanger (1970) desenvolveu a abordagem estática, ou analítica. Neste método todas as variáveis, sejam elas ambientais ou subjetivas, são controladas pela pesquisa de modo a resultar na combinação que melhor ilustre uma situação de conforto. Os experimentos foram realizados com pessoas de diversas nacionalidades, sexos e idades. Analisando dados como velocidade e umidade relativa do ar, temperatura, temperatura média radiante e fatores como atividade física e vestimenta; obtiveram-se índices como o Voto Médio Preditado (*predicted mean vote* – PMV), uma escala de sensação térmica de sete pontos; e a Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*predicted percentage of dissatisfied* - PPD). Os índices são correlacionados pelo gráfico da Figura 14.

Figura 14- Gráfico Voto Médio Predito x Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas.



Fonte: (Lamberts *et al*, 2014).

As pesquisas de Fanger foram adotadas pela norma ISO 7730 de 1984, com revisões em 1994 e 2005, quando incorpora outros estudos na área com avanços no tocante ao conforto.

Motivado por alguns entendimentos que confrontam com o método de Fanger, Michael Humphreys (1975) propõe o método adaptativo. Para o referido autor, o modelo analítico não considera o fato da aclimação do indivíduo, que leva à aceitabilidade de índices de conforto maiores dos que os propostos por Fanger, além disso, os resultados obtidos em câmaras condicionadas artificialmente não dialogam com os obtidos em ambientes naturalmente climatizados.

As pesquisas de Humphreys serviram de base para De Dear e Brager (1998), cujo trabalho foi adotado pela ASHRAE Standard 55 (2010). O modelo adaptativo apresentado na norma atende apenas a ambientes naturalmente ventilados, considerando, além dos aspectos físicos e psicológicos, que o indivíduo possa interagir com o meio controlando a abertura de janelas ou o nível de vestimenta, por exemplo. Este modelo determina uma temperatura operativa de conforto a partir da temperatura externa do ambiente, conforme a equação a seguir:

$$T_{oc} = 18,9 + 0,255 T_{ext} \quad (1)$$

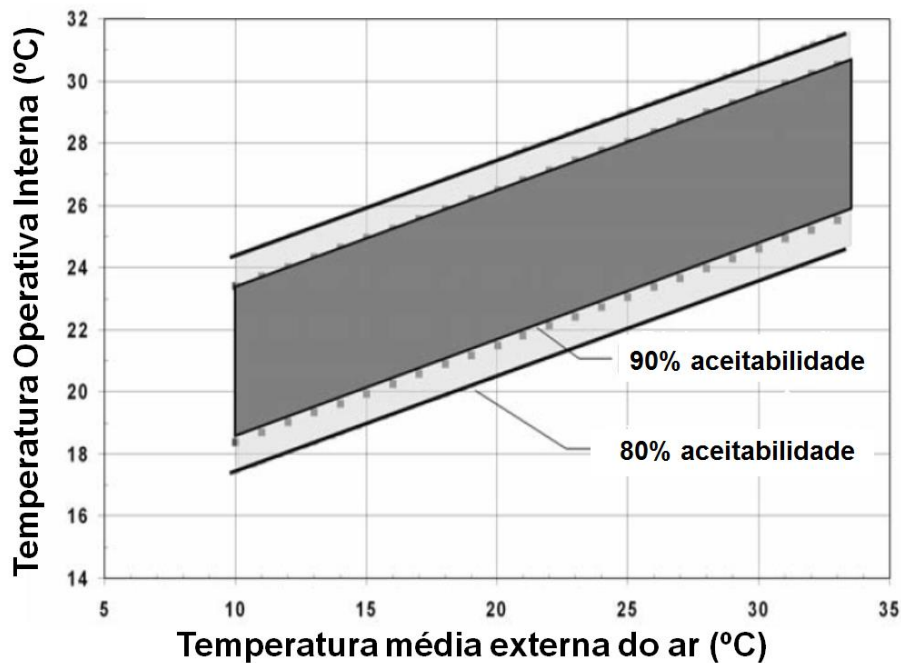
Onde:

T_{oc} = Temperatura operativa de conforto;

T_{ext} = Temperatura média mensal externa.

O gráfico da Figura 15 mostra os dois intervalos limites para aceitabilidade de padrão de conforto térmico desejado. A oscilação da temperatura operativa interna em relação à temperatura operativa de conforto entre $+2,5\text{ °C}$ e $-2,2\text{ °C}$ estabelece uma aceitabilidade de 90% (em cinza escuro), já a oscilação entre $+3,5\text{ °C}$ e $-3,2\text{ °C}$ corresponde a uma aceitabilidade de 80% (cinza claro).

Figura 15- Intervalos aceitáveis de Temperaturas Operativas para Espaços Condicionados Naturalmente



Fonte: (Adaptado de ASHRAE 55, 2010).

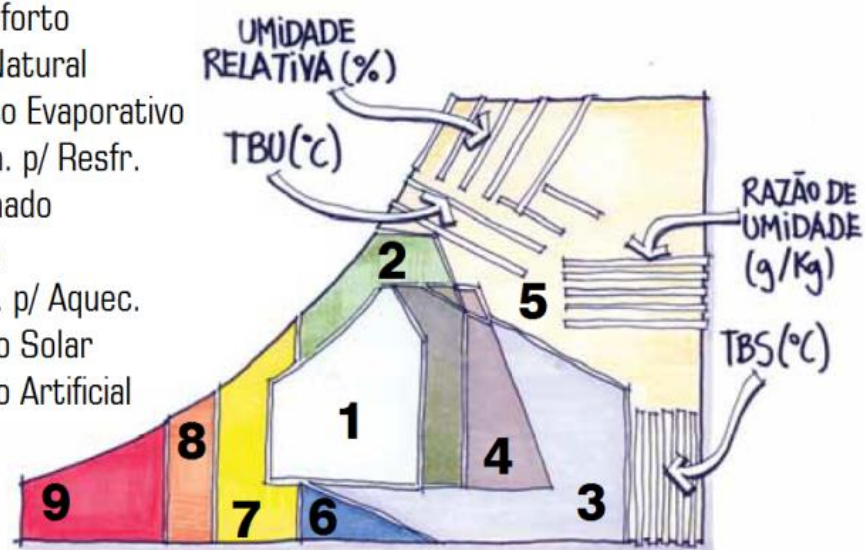
Um fator climático muito importante, mas não considerado pelo método adaptativo, é a umidade relativa do ar; que em análises de verão, por exemplo, influencia na sensação de conforto por conta do efeito da evapotranspiração. Contudo, a umidade é considerada em estudos referentes aos zoneamentos bioclimáticos.

Muitos estudos utilizaram variações de uma versão simplificada de classificação de quatro climas criada por Köppen na década de 1880, inclusive Givoni, que acrescentou uma quinta zona (Heywood, 2015). Givoni desenvolveu, em

1969, uma carta baseada na temperatura e umidade relativa do ar do ambiente exterior, propondo estratégias bioclimáticas que propiciem uma zona de conforto dentro da edificação. A carta, apresentada pela Figura 16 é considerada pela NBR 15220 (2005) adequada para o clima brasileiro e estabelece limites de temperatura entre 20 e 29°C para o verão e 18 e 27°C para o inverno.

Figura 16 – Carta bioclimática de Givoni.

- 1- Zona de Conforto
- 2- Ventilação Natural
- 3- Resfriamento Evaporativo
- 4- Inércia Térm. p/ Resfr.
- 5- Ar Condicionado
- 6- Umidificação
- 7- Inércia Térm. p/ Aquec.
- 8- Aquecimento Solar
- 9- Aquecimento Artificial



Fonte: (Adaptado de Lamberts *et al*, 2014).

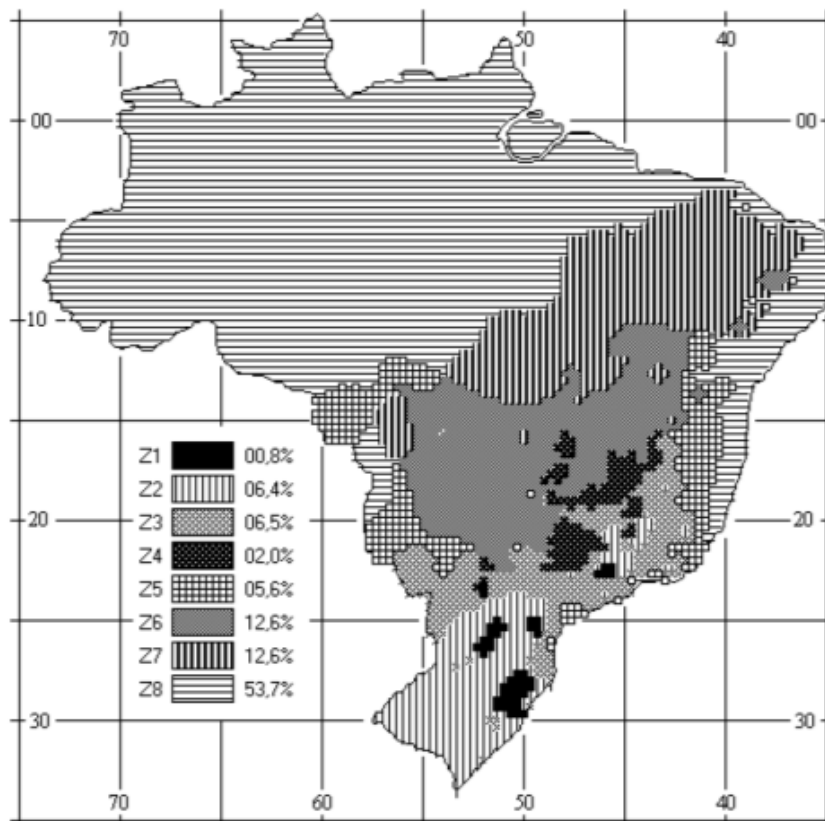
2.5.2 Normas de Desempenho Térmico

A NBR 15220 foi a primeira norma brasileira a tratar de desempenho térmico. É dividida em cinco partes, sendo que a terceira define oito zonas bioclimáticas como demonstra a Figura 17. Cada uma destas zonas possui indicações para tratamento adequado do conforto por meio de estratégias construtivas para condicionamento térmico da edificação. Tais estratégias são obtidas por meio da observação dos seguintes fatores: tamanho das aberturas para ventilação; proteção das aberturas; vedações externas (parede externa e cobertura); e estratégias de condicionamento térmico passivo.

O Rio Grande do Sul, está localizado em sua maioria na Zona Bioclimática 2 e o seu clima predominante é o Subtropical. Na parte central do estado situa-se a cidade de Santa Maria, palco da presente análise. A cidade é localizada na

Depressão Central do estado, mais precisamente na latitude sul 29°41'02" e longitude oeste 53°48'25" (ADESM, 2017) e também se enquadra na Zona Bioclimática 2.

Figura 17 – Zoneamento bioclimático brasileiro

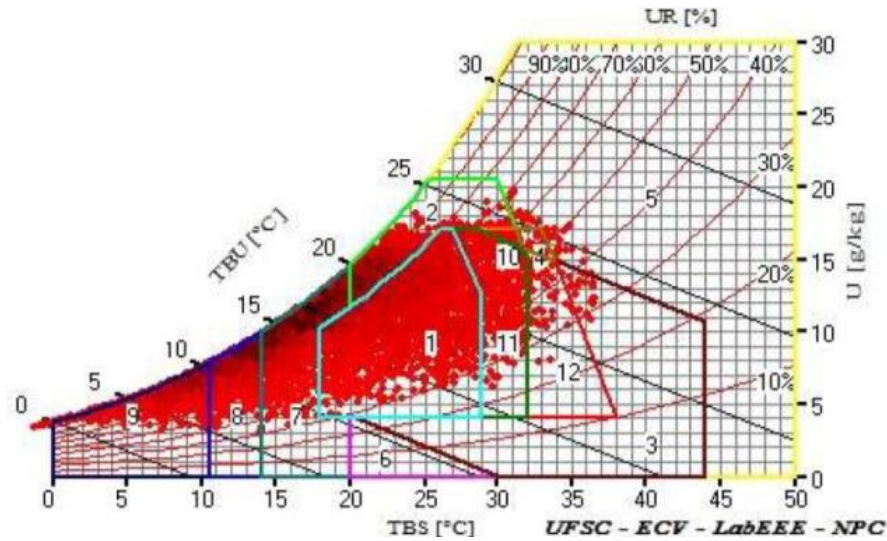


Fonte: (ABNT NBR 15220-3, 2005).

Apenas a observância da Zona Bioclimática não é suficiente para a aplicação de estratégias bioclimáticas em determinada localidade. O ideal é que se utilize a Carta Bioclimática obtida a partir do Ano Climático de Referência (TRY), que possui valores horários (LAMBERTS *et al*, 2014).

A carta bioclimática de Santa Maria (Figura 18) foi produzida por Flores (2014) a partir do programa *AnalysisBio*. Nesta carta, cada hora do ano é representada por um ponto vermelho localizado em uma das zonas especificadas pela Figura 16.

Figura 18 – Carta bioclimática da cidade de Santa Maria.



Fonte: (Flores, 2014).

Flores (2014) ainda reúne no Quadro 1 um relatório geral de estratégias bioclimáticas para a cidade de Santa Maria. Vale destacar que dos 20,3% de horas em desconforto por calor, 18,4% delas poderiam ser solucionadas com ventilação natural, restando ao ar condicionado o menor valor dentre as soluções para o calor: 0,525%.

Quadro 1 – Relatório geral das estratégias para Santa Maria

Conforto		30,6%
Desconforto		69,4%
	Calor	20.3%
	Ventilação	18.4%
	Alta Inércia p/ Resfriamento	0.741%
	Resfr. Evaporativo	0.704%
	Ar Condicionado	0.525%
	Frio	49.1%
	Aquecimento Solar /Inércia térmica	27.1%
	Aquecimento Solar Passivo	11.5%
	Aquecimento Artificial	10.5%
	Umidificação	0%

Fonte: (Flores, 2014).

A NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece critérios de desempenho a serem aplicados em edifícios habitacionais através de análise simplificada, medição e simulação. Esta norma é mais abrangente no âmbito dos edifícios habitacionais e orienta a utilização do programa *EnergyPlus* em simulações que visem analisar o desempenho térmico de edificações.

No que tange às vedações externas, a NBR 15220-2 (2005) recomenda que, para a Zona Bioclimática 2, os fechamentos verticais sejam leves e possuam uma transmitância térmica $U \leq 3,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, um atraso térmico ϕ de $\leq 4,3$ horas e um fator solar $FS_o \leq 5,0\%$. Entretanto, a NBR 15575-4 (2013) recomenda uma transmitância térmica (U) igual ou inferior a $2,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e uma capacidade térmica (CT) $\geq 130 \text{ kJm}^2\cdot\text{K}$ para a mesma zona bioclimática.

Quadro 2 - Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 2

Vedações externas
Parede: Leve
Cobertura: Leve isolada

Fonte: (ABNT NBR 15220-2, 2005).

Quadro 3 – Transmitância térmica

Transmitância térmica U W/m ² .K		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

^a α é absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: (ABNT NBR 15575-4, 2013).

Quadro 4 - Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (CT) kJ/m ² .K	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	Zona 8
≥ 130	Sem requisito

Fonte: (ABNT NBR 15575-4, 2013).

Além destas normas, o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R (2012) especifica requisitos técnicos a serem atendidos para etiquetagem do nível de eficiência energética em edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares.

Dentre os métodos recomendados pelo regulamento, está a simulação computacional. Para que um programa possa ser utilizado no processo de etiquetagem, o mesmo deve atender aos seguintes critérios: ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios; ser verificado de acordo com testes propostos pela ASHRAE *Standard* 140 -2004; modelar 8.760 horas por ano; modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, rede de ventilação natural e sistemas de condicionamento artificial, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados; modelar efeitos de inércia térmica; modelar efeitos de multi-zonas térmicas; ter capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto; determinar a capacidade solicitada pelo sistema de condicionamento de ar; produzir relatórios horários das trocas de ar e das infiltrações; produzir relatórios horários do uso final de energia. O programa utilizado neste trabalho, o *EnergyPlus*, satisfaz a estas prerrogativas.

O RTQ-R (2012) indica como metodologia de avaliação de edificações naturalmente ventiladas a comparação entre os indicadores de graus-hora de resfriamento com os níveis de eficiência do próprio arquivo climático utilizado na simulação. Ventilação, padrões de ocupação, iluminação, cargas internas de equipamentos e temperatura do solo; são outros aspectos a serem observados em simulações de edificações que possuem ventilação natural.

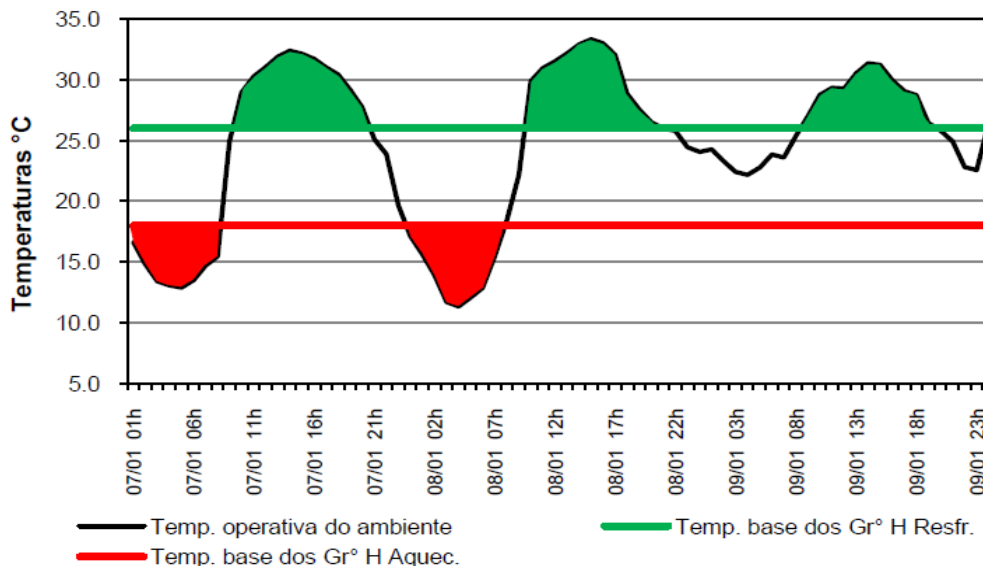
2.5.2.1 Graus-Hora

O número de graus-hora é um parâmetro que dá suporte à análise de eficiência energética de edificações, uma vez que permite que a quantidade de energia para climatização de um ambiente seja estimada. A contagem de graus-hora consiste na relação de horas em que os graus ficaram acima ou abaixo da temperatura de conforto estipulada, resultando na quantidade de horas em desconforto. Oliveira *et al* (2010) referem que o parâmetro define-se como o somatório das diferenças de temperatura, quando esta se encontra abaixo de uma

temperatura base (graus-hora de aquecimento); ou quando fica acima (graus-hora de resfriamento).

A Figura 19 ilustra um exemplo deste conceito. Baseado nos critérios da ISO 7730/2005, Sorgato (2009) tomou como base uma temperatura operativa de inverno entre 18°C e 22°C, e uma temperatura operativa de verão entre 23°C e 26°C; resultando em uma temperatura limite de graus-hora de aquecimento (linha vermelha) de 18°C e de graus-hora de resfriamento (linha verde) de 26°C. Cada vez que a curva da temperatura operativa do ambiente ultrapassou esses limites, ficaram definidos os graus-hora de resfriamento ou de aquecimento.

Figura 19 - Representação de graus-hora de resfriamento e aquecimento.



Fonte: (Sorgato, 2009).

2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O guia da CBIC (2013) orienta que para o modelo de simulação deve ser considerada a residência como um todo, reproduzindo fidedignamente as características construtivas e as propriedades dos materiais, sendo que cada ambiente deve ser considerado como uma zona térmica. Juntamente com características de aberturas, pé direito, materiais e dimensões de planta baixa; as condições climáticas também devem ser consideradas, incluindo temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, nebulosidade, direção e velocidade do vento.

Os programas de simulação para análise de eficiência energética ainda são pouco difundidos entre os profissionais de engenharia e arquitetura do Brasil (SORGATO, 2009). Talvez esse fato ocorra por conta da necessidade de domínio de muitas variáveis consideradas por programas como o *EnergyPlus* que, além disso, tem como a desvantagem uma interface de entrada de dados não muito amigável (OLIVEIRA, 2012).

Para este trabalho será utilizado o *software EnergyPlus*. Melo *et al* (2009) explicam que o EnergyPlus é um programa computacional, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Trata-se de um programa de análise de energia e simulação de carga térmica de edificações cujo manual (ENERGYPLUS, 2015) define quatro etapas de trabalho: planejamento da simulação; divisão da edificação em zonas; preparação das superfícies e dos elementos construtivos para modelação; e preparação das agendas de funcionamento para modelação.

Sobre dutos enterrados, ou *EarthTubes*, o manual *EnergyPlus Input and Output Reference* (ENERGYPLUS, 2015) explica que se tratam de dutos subterrâneos pelo qual o ar circula, podendo ser aquecido ou arrefecido. Assim como ocorre com a infiltração e a ventilação, o fluxo de ar do duto pode ser modificado pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo e a velocidade do vento. Outro fator que pode ser controlado é o horário operacional do duto através da indicação de temperatura mínima e máxima de funcionamento. A equação básica utilizada pelo *EnergyPlus* para calcular a taxa de fluxo de ar de um tubo enterrado (*EarthTube*) é:

$$\text{EarthTubeFlowRate} = (E_{design}) \cdot (F_{schedule}) [A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C_{(Wind\ Speed)} + D_{(Wind\ Speed^2)}]$$

Onde:

- E_{design} : vazão de ar no tubo em m³/s;
- $F_{schedule}$: agenda de tarefas que modifica a vazão no tubo;
- A: Constante térmica do solo, adimensional, que não sofre alteração pelos fatores ambientais;

- B: diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior (°C);
- $(T_{zone} - T_{odb})$: diferença de temperatura (°C) entre as temperaturas do ar de bulbo seco interior e exterior, abaixo do qual o *EarthTube* não é utilizado;
- C: velocidade do vento que está atuando fora do edifício (m/s);
- D: Coeficiente de fluxo vinculado ao quadrado da velocidade do vento, que é experimentada externamente ao edifício;
- Wind Speed: velocidade do ar no tubo (m/s).

Alguns dados de entrada são utilizados para a simulação de dutos enterrados: o raio, o comprimento e o diâmetro do duto; a distância entre a parte externa do duto e o solo não perturbado; a condutividade térmica do material do duto; a velocidade do ar dentro do duto; a densidade, o calor específico, a condutividade térmica, o coeficiente de absorvidade e a taxa da fração de evaporação do solo. Não é necessário que se insiram manualmente todos estes dados no programa (Figura 20), uma vez que o arquivo climático já traz uma série deles configurados.

Figura 20 - Interface de modelação do *ZoneEarthtube* no *EnergyPlus*

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. The 'Class List' on the left has 'ZoneEarthtube' selected. The 'Explanation of Object and Current Field' section displays the following information:

Object Description: Earth Tube is specified as a design level which is modified by a Schedule fraction, temperature difference and wind speed:
 $Earthtube = E_{design} * F_{schedule} * (A + B * (T_{zone} - T_{odb})) + C * WindSpd + D * WindSpd^2$

Field Description: "D" in Equation
 ID: N18
 Default: 0
 This field is required.

The table below shows the field values for three objects (Obj1, Obj2, Obj3):

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Zone Name		zona1	zona2	zona3
Schedule Name		sempre_ligado	sempre_ligado	sempre_ligado
Design Flow Rate	m ³ /s	0.1274	0.1474	0.4247
Minimum Zone Temperature when Cooling	C	20	20	20
Maximum Zone Temperature when Heating	C	32	32	32
Delta Temperature	deltaC	2	2	2
Earthtube Type		Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa	0	0	0
Fan Total Efficiency		1	1	1
Pipe Radius	m	0.15	0.15	0.15
Pipe Thickness	m	0.035	0.035	0.035
Pipe Length	m	35	35	35
Pipe Thermal Conductivity	W/m-K	1.75	1.75	1.75
Pipe Depth Under Ground Surface	m	3	3	3
Soil Condition		HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp
Average Soil Surface Temperature	C	20.19	20.19	20.19
Amplitude of Soil Surface Temperature	deltaC	7.55	7.55	7.55
Phase Constant of Soil Surface Temperature	days	231	231	231
Constant Term Flow Coefficient		1	1	1

Fonte: (Produzido pela pesquisadora com base no programa *EnergyPlus* 8.3.0, 2017).

Concomitante a isso, alguns dados do solo são gerados através de um programa auxiliar chamado *CalcSoilSurfTemp*, onde deve-se definir o tipo e a cobertura do solo entre as opções descritas pelo Quadro 5. O programa calcula, a partir do arquivo climático e do tipo e cobertura do solo especificados, a temperatura média do solo junto à superfície, a amplitude da variação da temperatura da superfície do solo e a constante de fase da superfície do solo.

Quadro 5 - Características do solo no *CalcSoilSurfTemp*.

Condições do solo em profundidade	Pesado e saturado	Condições do solo à superfície	Descoberto e molhado	
	Pesado e húmido		Descoberto e húmido	
	Pesado e seco		Descoberto e árido	
	Leve e seco		Descoberto e seco	
				Coberto e molhado
				Coberto e húmido
				Coberto e árido
				Coberto e seco

Fonte: (Sousa, 2014).

3 METODOLOGIA

De modo a atender os requisitos gerados pelos objetivos e pelo problema da pesquisa, serão descritas aqui as etapas metodológicas seguidas, visando traçar um plano de como se deu a análise para a obtenção dos resultados.

Trata-se de um estudo exploratório acerca do arrefecimento passivo de uma edificação hipoteticamente localizada na cidade de Santa Maria-RS, Zona Bioclimática 2, através de simulação computacional no *software EnergyPlus*. A pesquisa envolveu, em um primeiro momento, uma revisão bibliográfica para apropriação geral da temática de conforto térmico e eficiência energética das edificações. O processo metodológico ocorreu por meio de quatro etapas distintas, expostas na Figura 21.

Na primeira etapa de trabalho, definiu-se a tipologia da edificação em estudo: uma habitação unifamiliar de interesse social. A partir da determinação da geometria a ser analisada, partiu-se para a definição de fatores como o envelope, seguindo as condicionantes da NBR 15575-4 (2013) e da NBR 15220-2 (2005); e padrões de ocupação e de uso de iluminação e equipamentos, segundo diretrizes do RTQ-R (2012).

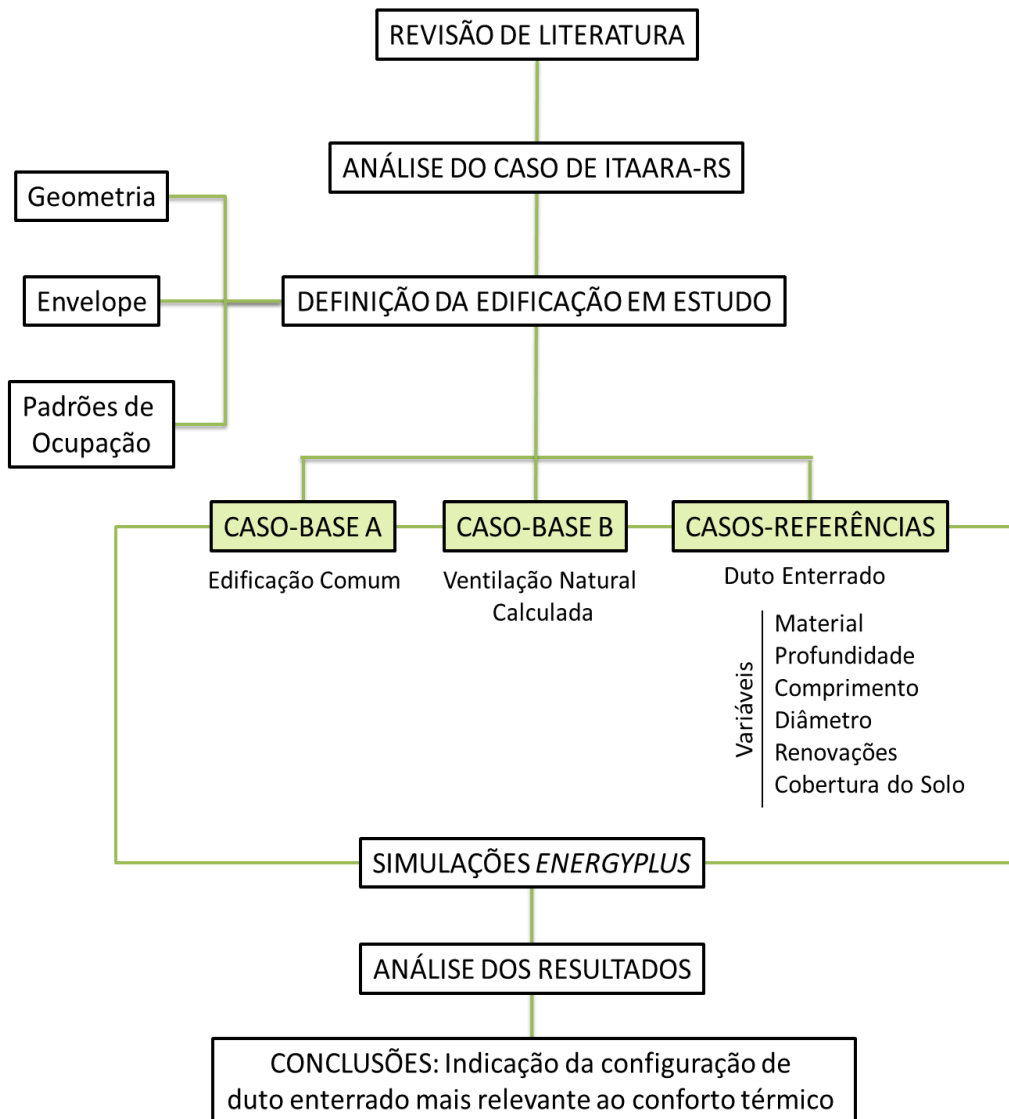
A segunda etapa consistiu na definição dos casos a serem submetidos à simulação computacional, todos com as mesmas características de fechamentos e ocupação, alterando-se apenas, estratégias de ventilação natural. O Caso-Base A trata de uma edificação comum, sem recursos especiais de ventilação, apenas considerando infiltração de ar. O Caso-Base B, foi proposto com uma ventilação natural calculada (*Airflownetwork*), a fim de proporcionar um modelo otimizado para comparação. Finalmente, estipularam-se 216 Casos-Referência, onde foram aplicados diversos arranjos, alternando configurações morfológicas de dutos enterrados (diâmetro, comprimento e profundidade) com fatores como o tipo de cobertura do solo e número de renovações do sistema.

A simulação computacional foi desenvolvida na terceira etapa do trabalho com a utilização do *software EnergyPlus*, versão 8.3 e com o arquivo climático para a cidade de Santa Maria. A simulação foi precedida pela modelagem da edificação no programa *SketchUp 2015* com o auxílio do *software OpenStudio*.

A quarta e última fase metodológica compreendeu a análise dos resultados gerados pelo programa avaliando o conforto térmico através do modelo adaptativo e

quantificando o número de graus-hora de resfriamento. Após buscarem-se entendimentos sobre a correlação entre as variáveis testadas e os resultados obtidos, foram elaboradas as considerações finais da pesquisa.

Figura 21 – Esquema metodológico



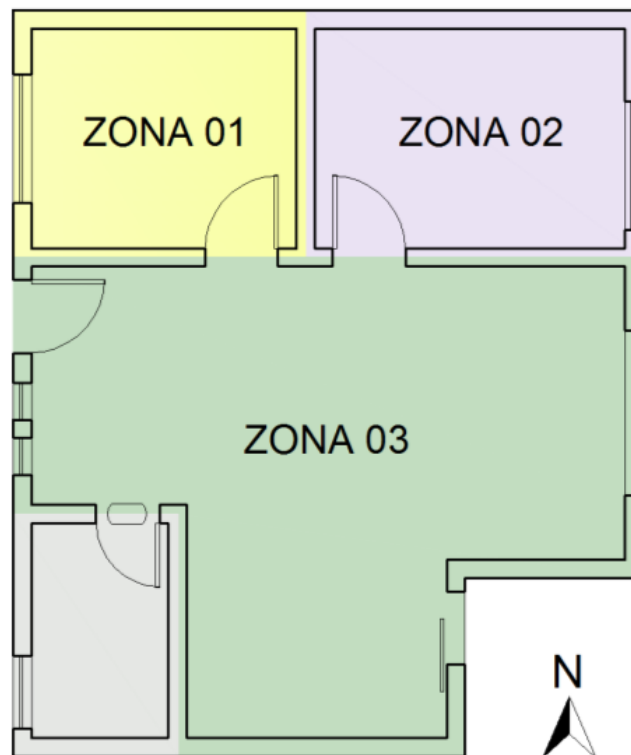
Fonte: (Produzido pela pesquisadora 2017).

3.1 DEFINIÇÃO DO CASO-BASE A

Conforme a NBR 15575-1 (2013), “para a geometria do modelo de simulação, deve ser considerada a habitação como um todo, considerando cada ambiente como

uma zona térmica”. Deste modo, para a presente análise elencou-se uma edificação unifamiliar utilizada por Oliveira (2012) e Soares (2014), norteados pelas especificações mínimas a serem atendidas pelo programa do Governo Federal “Minha Casa, Minha Vida 2” segundo o Ministério das Cidades. Para os referidos autores, a Habitação de Interesse Social em questão representa uma tendência atual da construção civil no país no que tange ao setor residencial, foco desta análise. Na presente análise consideraram-se ambos os dormitórios (Zonas 01 e 02) e a Sala de Estar/Cozinha (Zona 03).

Figura 22 - Planta baixa com divisão das Zonas Térmicas



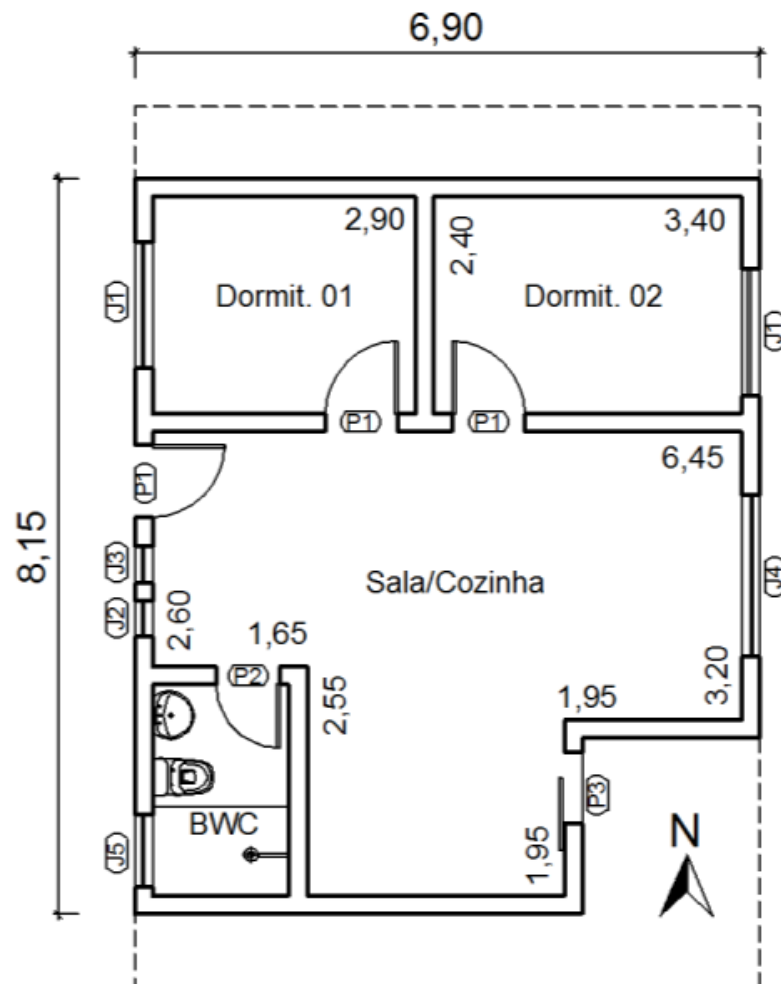
Fonte: (Adaptado de OLIVEIRA, 2012).

Para o Caso-Base A serão consideradas as configurações de geometria, envelope, agendas de ocupação e iluminação, infiltração e demais propriedades explanadas a seguir. Este caso foi simulado sem a presença da ventilação natural por meio de duto enterrado.

3.1.1 Geometria da Edificação

Considerou-se uma edificação térrea em alvenaria de tijolos cerâmicos composta por dois dormitórios, sala e cozinha conjugadas e banheiro, assim como apresentado na Figura 23. A habitação possui um pé-direito de 2,70 metros, beirais nas faces norte e sul de 0,80 metros e esquadrias seguindo as especificações da Tabela 4.

Figura 23 – Planta baixa da edificação



Fonte: (Adaptado de OLIVEIRA, 2012).

Tabela 4 - Especificações de Esquadrias

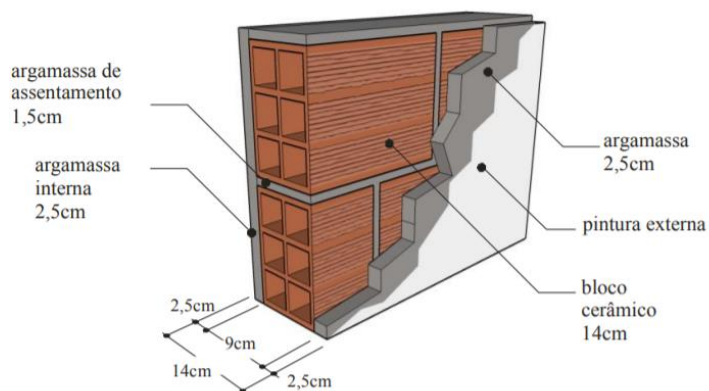
ESQUADRIA	DIMENSÕES (m)	TIPOLOGIA
J1	1,40 x 1,10 / 1,00	Janela de correr
J2	0,40 x 1,00 / 1,00	Janela de correr
J3	0,40 x 1,00 / 0,60	Janela de correr
J4	1,80 x 1,10 / 1,00	Janela de correr
J5	0,80 x 0,60 / 1,50	Janela Maxim-Ar
P1	0,80 x 2,10	Porta de abrir
P2	0,70 x 2,10	Porta de abrir
P3	0,80 x 2,10	Porta de correr

Fonte: (Produzido pela pesquisadora 2017).

3.1.2 Características do Envelope

De modo a cumprir com as indicações das normas referenciadas pelo item 2.5.1 deste estudo, elencou-se para os fechamentos opacos verticais a parede descrita pela Figura 24 cuja configuração é sugerida pelo Anexo Geral V do manual RAC - Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (2013). Trata-se de uma parede de alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos assentados a cutelo, com argamassa de reboco de 2,5 cm em ambas as faces. Como fechamento horizontal de cobertura, optou-se por uma laje de concreto maciça de 10 cm de espessura descrita pela Figura 25, também indicada pelo mesmo Anexo do RAC (2013). A telha utilizada é de fibrocimento 6 mm.

Figura 24 – Parede de alvenaria utilizada no estudo.



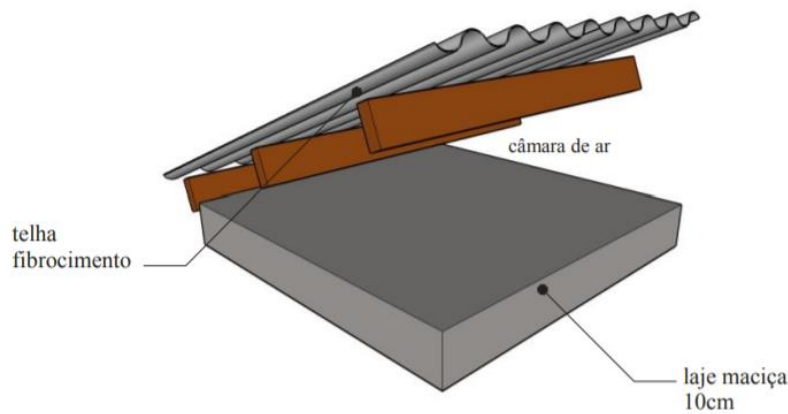
Descrição:

Argamassa interna (2,5cm)
 Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm)
 Argamassa externa (2,5cm)
 Pintura externa (α)

U	C_T
[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]
2,46	150

Fonte: (INMETRO, 2013).

Figura 25 – Cobertura utilizada no estudo.



Descrição:

Laje maciça (10,0cm)
Câmara de ar (> 5,0 cm)
Telha fibrocimento

U	C _T
[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]
2,06	233

Fonte: (INMETRO, 2013).

3.1.3 Padrão de Ocupação

O Manual *Input Output Reference* da versão 8.3 do *EnergyPlus* (2015) expõe que a configuração de agendas ou *schedules* permitem que o programa processe e armazene dados baseados em rotinas horárias, semanais ou anuais. Essas rotinas garantem ao usuário o controle de itens como densidade de ocupação, iluminação, controles termostáticos, atividade de ocupação, elementos de sombreamento, ventilação, entre outros, além de possuir descrições identificadas para cada dia da semana, feriados, etc.

Como é descrito no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2012) “o padrão mínimo de ocupação dos dormitórios deve ser de duas pessoas por ambiente e a sala deve ser utilizada por todos os usuários dos dormitórios”. Deste modo, por possuir dois dormitórios, considera-se que a edificação em estudo é habitada por quatro pessoas.

Para a presente análise foram consideradas as agendas de ocupação para os dias da semana, com a porcentagem de pessoas disponíveis por horário na sala e nos dormitórios conforme apresentado na Tabela 5.

As taxas metabólicas consideradas são descritas pelo RTQ-R (2012) na Tabela 6 tomando como base uma área de pele equivalente a uma pessoa de estatura média.

Tabela 5 - Padrão de ocupação para dias de semana e final de semana

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)
1 h	100	100	0	0
2 h	100	100	0	0
3 h	100	100	0	0
4 h	100	100	0	0
5 h	100	100	0	0
6 h	100	100	0	0
7 h	100	100	0	0
8 h	0	100	0	0
9 h	0	100	0	0
10 h	0	50	0	0
11 h	0	0	0	25
12 h	0	0	0	75
13 h	0	0	0	0
14 h	0	0	25	75
15 h	0	0	25	50
16 h	0	0	25	50
17 h	0	0	25	50
18 h	0	0	25	25
19 h	0	0	100	25
20 h	0	0	50	50
21 h	50	50	50	50
22 h	100	100	0	0
23 h	100	100	0	0
24 h	100	100	0	0

Fonte: (INMETRO, 2012).

Tabela 6 - Taxas metabólicas para cada atividade

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ² (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: (INMETRO, 2012).

3.1.4 Padrão de Uso de Iluminação e Equipamentos

O RTQ-R (2012) também recomenda padrões horários de uso de iluminação para ambientes de permanência prolongada. A Tabela 7 demonstra os dados de iluminação utilizados na simulação, para os dias de semana, considerando 100% para os horários em que as luzes estão acesas e 0% para os horários em que estão apagadas. Deve-se utilizar uma densidade de potência instalada de 5,0 W/m² para dormitórios e de 6,0 W/m² para salas.

Tabela 7 - Padrão de uso de iluminação

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)
1 h	0	0	0	0
2 h	0	0	0	0
3 h	0	0	0	0
4 h	0	0	0	0
5 h	0	0	0	0
6 h	0	0	0	0
7 h	100	0	0	0
8 h	0	0	0	0
9 h	0	100	0	0
10 h	0	0	0	0
11 h	0	0	0	100
12 h	0	0	0	100
13 h	0	0	0	0
14 h	0	0	0	0
15 h	0	0	0	0
16 h	0	0	0	0
17 h	0	0	100	100
18 h	0	0	100	100
19 h	0	0	100	100
20 h	0	0	100	100
21 h	100	100	100	100
22 h	100	100	0	0
23 h	0	0	0	0
24 h	0	0	0	0

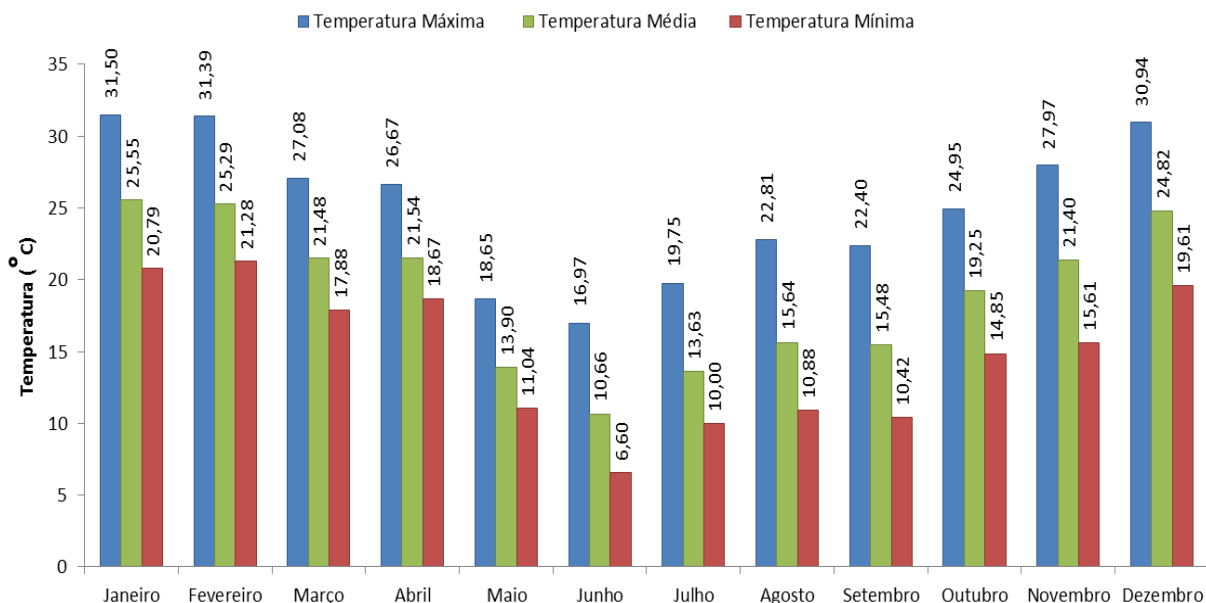
Fonte: (INMETRO, 2012).

Em unidades habitacionais, o RTQ-R (2012) orienta que se deve considerar uma carga interna de equipamentos apenas para a sala. Esta potência deverá ser de 1,5 W/m² e deve permanecer ativa durante todas as 24 horas do dia.

3.1.5 Modelagem e Simulação

Por tratar de arrefecimento passivo e para evitar que os dados de verão fossem mascarados pelos de inverno, as informações de saída originadas pelo *EnergyPlus* foram configuradas para gerarem resultados apenas para os meses mais quentes do ano: dezembro, janeiro e fevereiro. O gráfico expresso pela Figura 26, produzido através dos dados do INMET para a cidade de Santa Maria - RS demonstra que o referenciado trimestre possuiu as mais elevadas médias de temperatura no ano de 2016. De modo a complementar esses dados, Flores (2014) apresenta na Tabela 8 a relação de temperaturas obtidas entre os anos de 1961 e 1990 pelo INMET, onde também é possível observar as temperaturas mais elevadas nos referidos meses.

Figura 26 – Gráfico de dados climáticos de Santa Maria do ano de 2016.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora 2017).

Tabela 8 - Temperaturas máximas, mínimas e médias obtidas no período entre 1961 e 1990.

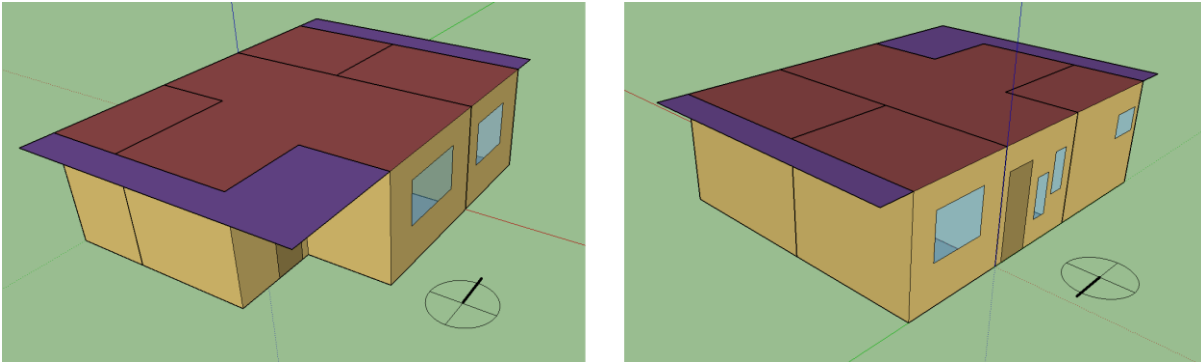
MÊS	T. Máxima	T. Média	T. Mínima
Janeiro	30,4	24,2	19,1
Fevereiro	30,0	23,9	19,5
Março	28,2	21,9	17,9
Abril	25,0	18,4	14,5
Mai	22,1	15,9	11,8
Junho	19,2	13,9	9,3
Julho	19,6	14,1	9,5
Agosto	20,3	14,2	10,4
Setembro	22,5	16,5	11,3
Outubro	24,8	18,6	13,5
Novembro	27,3	21,0	15,9
Dezembro	29,5	23,3	18,3

Fonte: (FLORES, 2014).

Com o intuito de que os resultados obtidos a partir da simulação computacional sejam o mais fidedignos com a realidade o possível, é necessário que se utilize um arquivo climático que contenha todos os dados da região analisada. Utilizou-se para as simulações realizadas neste trabalho o arquivo climático da cidade de Santa Maria – RS, representativo da Zona Bioclimática 2, em formato *EnergyPlus Weather* (EPW) e baseado no ano climático de referência *Test Reference Year* (TRY).

A geometria do modelo digital foi desenvolvida pelo *plug-in Legacy OpenStudio*, versão 1.0.13, instalado no *software SketchUp 2015*, um programa de Desenho Auxiliado por Computador – CAD e apropriado para modelação tridimensional. Depois de gerados os arquivos de entrada de dados em formato Input Data File - IDF, como visualizado na Figura 27, as demais configurações foram trabalhadas no *EnergyPlus*, versão 8.3.0.

Figura 27 – Edificação modelada no SketchUp pelo *plug-in* Legacy OpenStudio.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora 2017).

Lamberts e Versage (2010) demonstram o esquema de cores adotado pelo *OpenStudio* para facilitar a identificação de elementos: em amarelo as paredes, em marrom as lajes, em ocre as portas, em roxo os elementos de sombreamento e, representadas por um azul-claro translúcido, as janelas. Os autores (2010, p.6) ainda tratam da importância de que em edificações com múltiplas zonas observe-se que “superfícies coplanares de duas zonas adjacentes precisam ser combinadas para que sejam feitos os cálculos de trocas de calor entre elas”. No caso em estudo, foi utilizado o comando *MatchSurfaces* para garantir a correta combinação entre as superfícies sobrepostas.

3.1.6 Temperatura do Solo

Nas simulações de edificações térreas a temperatura do solo é um requisito fundamental na obtenção de resultados, já que as trocas térmicas com o piso influenciam nos resultados finais das trocas de calor do ambiente (OLIVEIRA, 2012). O RTQ-R (2012, p.72), entretanto, expõe que “os valores de temperatura do solo dos arquivos climáticos não são recomendados para o uso em simulações térmicas e energéticas”. Neste caso a temperatura do solo deve ser calculada de acordo com as especificidades de cada projeto, considerando a geometria da edificação, as propriedades térmicas dos materiais, a ventilação e as *schedules*.

Para tanto, é possível utilizar pré-processadores como o *Basement*, indicado para edificações com porões e subsolos, ou o *Slab*, ideal para edificações com laje em contato direto com o solo, como é o caso da edificação em estudo. Os valores gerados no *Slab* através do objeto *Detailed Ground Heat Transfer*, que indicam as

médias das temperaturas do solo para cada mês do ano da HIS analisada, estão apresentados da Tabela 9.

Tabela 9 – Temperatura médias do solo em °C.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Caso Base A	28,03	27,38	25,59	22,56	17,95	16,26	16,69	18,06	18,47	21,21	23,96	27,12
Caso Base B	26,77	26,23	25,23	23,14	18,83	17,06	17,59	18,92	19,44	22,05	24,05	26,08
Casos Referência	28,23	27,52	25,8	22,85	18,35	16,54	17,01	18,27	18,74	21,31	23,94	27,21

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Os valores foram calculados para o Caso Base-A, Caso Base-B e para o primeiro arranjo “S001” de dutos enterrados para os Casos-Referência, conforme configuração disponível no Apêndice A. O cálculo das temperaturas do solo pelo *Slab* para todos os 216 arranjos com *Earthtubes* contemplados pela pesquisa tornaria todo o processo inviável por conta da sua extensa metodologia. Após alguns testes com diferentes arranjos observou-se a mínima influência das variáveis do duto nas temperaturas do solo, o que ratificou a adoção de um quadro único de temperaturas para todos os Casos-Referência.

3.1.7 Infiltração de Ar

Ao contrário da ventilação, que se define pela introdução intencional de ar em uma edificação; a infiltração se caracteriza pelo fluxo incontrolado de ar que se dá no sentido de fora para dentro da edificação, geralmente indesejado, e que permeia por frestas em esquadrias externas (ASHRAE, 2009). No *EnergyPlus* é possível que se configurem infiltrações de ar no campo *ZoneInfiltration: DesignFlowRate*.

O guia CIBSE (2006) orienta a utilização de uma infiltração de 1,15 trocas de ar por hora em edificações residenciais de um pavimento e pouco estanques. Entretanto, o guia pondera que este valor pode variar de acordo com a exposição do terreno a ventos, levando ao acréscimo de 50% em terrenos severamente expostos e redução de 33% em locais mais protegidos, por exemplo.

O RTQ-R (2012) estabelece coeficientes adimensionais de rugosidade para o entorno em relação ao perfil de obstrução dos arredores da edificação. Tais coeficientes consideram locais como grandes centros urbanizados; onde pelo menos

50% das edificações possuem altura superior a 21 metros; perpassando por áreas de subúrbio massivamente residenciais; até áreas completamente desobstruídas e próximas a corpos de água.

Considerando os dados expostos junto ao fato de que o objeto de estudo trata-se de uma Habitação de Interesse Social, tipologia que normalmente encontra-se situada em loteamentos em bairros vicinais, adotou-se para todos os casos simulados uma infiltração padrão igual a uma troca de ar por hora.

3.2 DEFINIÇÃO DO CASO-BASE B - AIRFLOWNETWORK

O Caso-Base B foi considerado com as mesmas características já especificadas para o Caso-Base A. O diferencial deste modelo é a configuração de uma ventilação natural calculada, de modo a otimizar o aproveitamento desta estratégia e reduzir o consumo com sistemas ativos de refrigeração.

No *EnergyPlus* o objeto *AirflowNetwork*, direcionado à ventilação natural, calcula o fluxo de ar entre zonas e o exterior, através de frestas e janelas. O *SimulationControl* define alguns parâmetros básicos para a simulação de ventilação: coeficientes de pressão, relação entre a altura da edificação e a área do piso, relação entre o menor e o maior eixo da edificação, etc.

Para as infiltrações estipularam-se os valores de portas e janelas de acordo com o que Pereira *et al* (2013) recomendam em seu Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa *EnergyPlus*. Quando fechadas, o coeficiente de fluxo de ar para as portas pivotantes de madeira é de 0,00187; para as janelas de madeira com duas folhas deslizantes na vertical o fluxo é de 0,00022.

Essa ventilação natural é calculada pelo programa de maneira otimizada, considerando o que se pode chamar de sistema automático, uma vez que prevê a abertura das janelas sempre que a temperatura interna da edificação ultrapassar uma temperatura definida como *setpoint*. A simulação foi configurada com abertura total das portas e abertura total da área ventilável das janelas (50% da área total da janela tipo guilhotina). A temperatura de *setpoint* de abertura de janelas foi estipulada em 25°C, com base no trabalho de Martins *et al* (2009). Ou seja, as janelas serão automaticamente abertas quando a temperatura interna alcança os

25°C e a temperatura externa apresenta-se em condições satisfatórias, entre 20 e 25°C.

3.3 DEFINIÇÃO DOS CASOS-REFERÊNCIA - EARTHTUBES

Os Casos-Referência são o foco principal do presente estudo e mantêm todas as propriedades já definidas para o Caso-Base A, inclusive a infiltração de ar. Além destas, os casos incorporaram dutos enterrados através da combinação de diferentes características de duto, renovação do ar e solo (Figura 28).

A entrada de dados referentes aos dutos enterrados no *EnergyPlus* acontecem através do campo *ZoneEarthTube*. Para tal, estipulou-se uma temperatura mínima de resfriamento de 20°C, isto é, quando a temperatura interna da edificação está acima desta temperatura, a ventilação por meio do duto enterrado é ativada. No campo *DeltaTemperature* foi estipulada uma diferença de temperatura de 2°C, ou seja abaixo desta diferença entre a temperatura interna e a externa o *EarthTube* será desligado. Então, o tubo será ligado sempre que a temperatura interna atingir 20°C desde que a diferença entre a temperatura interna e a externa seja maior que 2°C.

Figura 28 – Esquema de variáveis consideradas nos Casos-Referência.

Duto		Renovações	Solo
Material	Concreto Armado	01 ren/hora	Solo Coberto
Profundidade	1,5 m	05 ren/hora	Solo Descoberto
	3,0 m	10 ren/hora	
	4,5 m	20 ren/hora	
Comprimento	20,0 m		
	35,0 m		
	50,0 m		
Diâmetro	0,20 m		
	0,30 m		
	0,50 m		

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Cada uma das variáveis foi definida seguindo critérios específicos. Acerca da morfologia do duto, após a definição do concreto armado para o material, variaram-se: as profundidades com base nos resultados apresentados por Longo (2014); os diâmetros por meio de uma análise de mercado dos dutos de concreto mais fabricados na região do estudo; e os comprimentos, baseando-se nas indicações de Sousa (2014) e Heywood (2015), e na observação das dimensões da maioria dos terrenos residenciais da região. Para a vazão do duto, elencaram-se 01 renovação/hora; 05 renovações/hora; 10 renovações/hora e 20 renovações/hora. Na prática, esta variável pode ser controlada por meio de ventiladores mecânicos. O solo seguiu as características demonstradas pelo Quadro 5, definindo-se um solo pesado e úmido quanto às condições em profundidade e variando as condições de superfície entre descoberto e úmido e coberto e úmido. O arranjo das variáveis resultou em um total de 216 simulações, cujas configurações encontram-se detalhadas nos Apêndices A, B, C e D deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão explanados os resultados obtidos através da simulação computacional para o Caso-Base A, cuja configuração não abrange ventilação natural ou dutos enterrados; para o Caso-Base B, no qual se configurou uma ventilação natural calculada através do campo *AirflowNetwork*; e para os Casos-Referência, para os quais consideraram-se diversas combinações de variáveis de dutos enterrados, originando um total de 216 simulações. Estes resultados foram gerados para o período de verão, compreendendo os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, analisando as 24 horas do dia. Foram considerados os ambientes de permanência prolongada: Zona 1 e Zona 2 – dormitórios; Zona 3 – estar/cozinha; dispostos como demonstrado na Figura 22.

Para a análise do conforto adaptativo foram calculadas o número de horas em conforto com base na temperatura operativa gerada para cada hora do trimestre pelo *EnergyPlus*. Considerou-se uma aceitabilidade de 80%, com oscilação de $+3,5^{\circ}\text{C}$ e $-3,2^{\circ}\text{C}$ da temperatura operativa interna em relação à temperatura operativa de conforto, que é dada a partir da temperatura média mensal externa.

O número de graus-hora de resfriamento foi definido a partir dos limites superiores da temperatura operativa de conforto. Sempre que a temperatura interna de cada zona ultrapassou este limite foram contabilizados graus-hora de resfriamento.

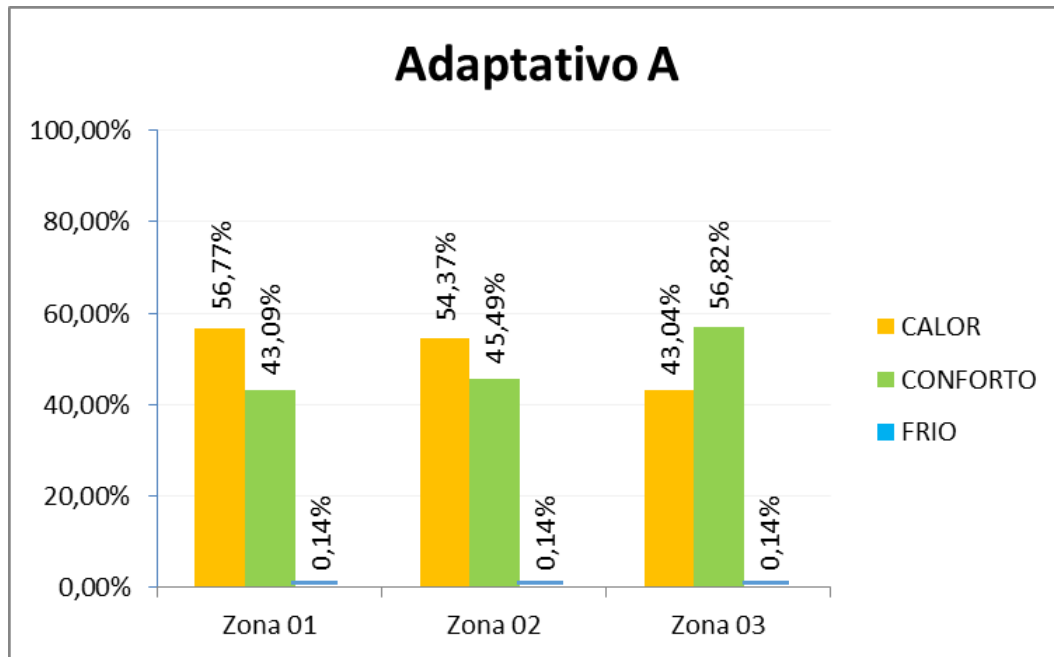
4.1 CASO-BASE A

O Caso-Base A trata de uma simulação sem sistemas de ventilação ou dutos enterrados, possuindo apenas uma infiltração de ar de uma renovação por hora. Este caso foi simulado desta maneira para que possa gerar um parâmetro de comparação com as simulações em que foram configurados os *EarthTubes*, já que a única diferença entre o Caso-Base A e os Casos-Referência é a adição do duto enterrado.

Como esperado, o gráfico expresso pela Figura 29 demonstra uma situação de alto índice de desconforto por calor. As Zonas 1 e 2, de orientação solar norte, possuem mais horas em calor do que em conforto. A Zona 3, cuja orientação é sul,

possui um índice de conforto um pouco maior, mas ainda é expressiva a quantidade de horas em desconforto por calor.

Figura 29 – Percentual de horas em conforto e desconforto por calor para o Caso-Base A.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

O Caso-Base A registrou os seguintes resultados de graus-hora de resfriamento: 1782 para a Zona 1; 1470 para a Zona 2 e 1217 para a Zona 3. Estes dados encontram-se melhor ilustrados no gráfico da Figura 45.

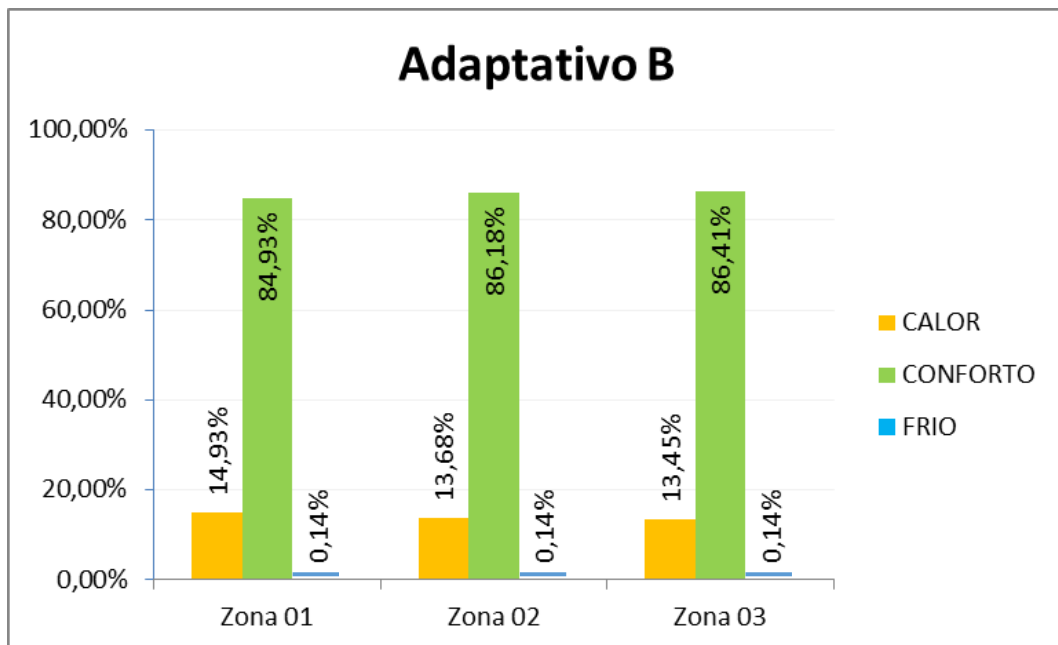
4.2 CASO-BASE B

Assim como já exposto, o Caso-Base B foi definido para representar uma situação ideal de conforto, servindo como um modelo aperfeiçoado para equiparação com as outras simulações. Sua configuração envolveu a definição de um sistema potencializado, onde a ventilação natural através da abertura de portas e janelas é acionada sempre que a temperatura interna atingir um limite máximo de 25°C, conforme estipulado para a temperatura de *setpoint*.

Este caso não considerou ventilação por meio de dutos enterrados. Os parâmetros definidos são iguais aos descritos para o Caso-Base A, com a adição da configuração do campo *AirflowNetwork*.

Os resultados das simulações são descritos pela Figura 30, que permite analisar o elevado percentual de horas em conforto em relação às horas em desconforto por calor. Neste caso, a ação da ventilação natural passa a ser protagonista sobre os resultados, em detrimento da ação da orientação solar.

Figura 30- Percentual de horas em conforto e desconforto por calor para o Caso-Base B.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Para o Caso-Base B computaram-se os seguintes resultados de graus-hora de resfriamento: 342 para a Zona 1; 291 para a Zona 2 e 301 para a Zona 3. O resumo da comparação das simulações de graus-hora está disponível no gráfico da Figura 45.

4.3 CASOS-REFERÊNCIA

Objetos principais deste estudo, os dutos enterrados, ou *EarthTubes*, bem como todas as variáveis já descritas que os envolvem, geraram um total de 216 simulações, cada uma delas com uma diferente combinação de propriedades. Para o completo entendimento destes arranjos, é conveniente a observação da descrição de cada simulação nos Apêndices localizados no final deste trabalho.

Os resultados dos Casos-Referência foram catalogados em infográficos para favorecer a visualização da influência de todas as variáveis. De modo a facilitar a leitura, uma escala de cores em *dégradé* foi adotada indo do amarelo (menor conforto) ao verde (maior conforto). Os infográficos incorporaram apenas os percentuais das horas em conforto térmico, apresentando os resultados mais relevantes através de destaques em vermelho.




Os graus-hora de resfriamento também foram catalogados em infográficos. Para uma melhor visualização dos valores, os mesmos foram dispostos através da adoção de uma escala de tons avermelhados, indo do claro (menor número de graus-hora de resfriamento) ao escuro (maior número de graus-hora de resfriamento).

4.3.1 UMA RENOVAÇÃO POR HORA (01 REN/HORA)

A configuração de uma renovação por hora resultou em dados bastante aproximados entre as variáveis, ficando muito abaixo dos índices de conforto alcançados pelo Caso-Base B. Os retângulos em vermelho destacam os melhores resultados, cujos índices de maior conforto ocorreram no solo descoberto.


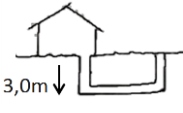
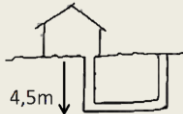

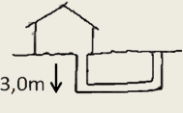

Figura 31 – Percentuais de horas em conforto para 01 ren/hora.

CONFORTO ADAPTATIVO

1 RN										Diâmetro	
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3		
	Zona										
Solo Coberto	Profundidade	Comprimento									20m
											35m
											50m
	1,5m ↓										20m
											35m
											50m
	3,0m ↓										20m
											35m
											50m
	4,5m ↓										20m
											35m
											50m
Solo Descoberto	1,5m ↓										20m
											35m
											50m
	3,0m ↓										20m
											35m
											50m
	4,5m ↓										20m
											35m
											50m

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 32 - Graus-hora de resfriamento para 01 ren/hora.

		GRAUS-HORA CALOR									Diâmetro		
		Ø20			Ø30			Ø50				Zona	
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Comprimento		
Solo Coberto	Profundidade	1319	1056	906	1327	1075	919	1329	1076	947		20m	
			1296	1053	886	1303	1047	895	1304	1048	923	35m	
			1283	1018	879	1288	1031	883	1289	1033	906	50m	
			1248	982	852	1264	1018	870	1267	1022	913	20m	
			1201	944	822	1215	975	833	1220	978	875	35m	
			1175	926	810	1187	949	818	1190	952	852	50m	
			1255	993	840	1250	1007	860	1254	1012	907	20m	
			1179	926	809	1198	960	822	1203	964	866	35m	
			1149	906	797	1162	932	805	1165	936	840	50m	
			1289	1022	882	1300	1050	896	1302	1053	932	20m	
	Solo Descoberto			1254	991	858	1264	1014	867	1267	1018	901	35m
				1238	980	850	1246	995	856	1248	997	882	50m
			1211	952	826	1233	993	848	1238	998	897	20m	
			1149	904	792	1176	942	807	1180	947	853	35m	
			1121	881	778	1134	910	788	1138	914	825	50m	
			1195	936	814	1218	980	836	1223	985	889	20m	
			1125	883	778	1147	923	793	1151	929	841	35m	
			1097	859	763	1111	890	772	1115	895	813	50m	

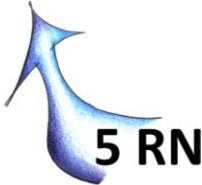







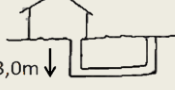

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

4.3.2 CINCO RENOVAÇÕES POR HORA (05 REN/HORA)

Mesmo ainda estando abaixo dos padrões alcançados através da ventilação natural calculada, o aumento das renovações ampliou a sensação de conforto em todas as zonas, já sendo possível identificar a eficácia do sistema. Nos detalhes em vermelho, observam-se percentuais de horas em conforto superiores a 80%.


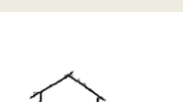
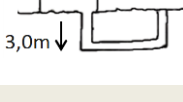

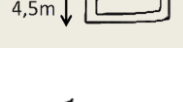
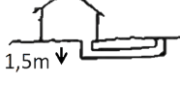

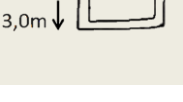

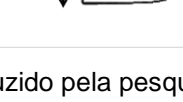


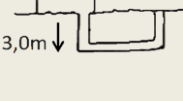


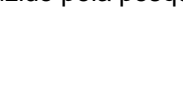



Figura 33 - Percentuais de horas em conforto para 05 ren/hora.

CONFORTO ADAPTATIVO

											Diâmetro	
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3		Zona
Solo Coberto	Profundidade	72,49%	75,08%	75,91%	71,80%	74,76%	75,82%	71,10%	74,57%	75,68%	20m	
		73,79%	76,10%	76,38%	73,19%	75,87%	76,28%	72,49%	74,94%	76,01%	35m	
		74,25%	76,61%	76,84%	73,88%	76,24%	76,61%	73,14%	76,01%	76,38%	50m	
		76,93%	78,59%	76,79%	76,01%	77,44%	76,47%	74,29%	76,56%	76,33%	20m	
		79,06%	80,31%	78,36%	78,09%	79,61%	77,85%	76,84%	78,41%	77,12%	35m	
		80,35%	82,25%	79,70%	79,66%	80,81%	78,96%	78,18%	79,75%	78,04%	50m	
		77,62%	78,87%	77,12%	76,70%	78,18%	76,84%	74,57%	76,88%	76,51%	20m	
		79,84%	81,41%	79,10%	78,83%	80,26%	78,22%	77,53%	79,01%	77,67%	35m	
		80,77%	82,80%	79,94%	80,12%	81,78%	79,61%	78,96%	80,81%	78,83%	50m	
		74,29%	76,84%	76,51%	73,69%	76,05%	76,19%	72,45%	75,31%	75,96%	20m	
	Solo Descoberto		75,96%	78,09%	77,21%	75,59%	77,44%	76,88%	74,16%	76,84%	76,70%	35m
			76,75%	78,92%	77,81%	76,14%	78,36%	77,76%	75,40%	77,67%	77,16%	50m
78,64%			79,84%	77,39%	77,53%	78,92%	77,02%	75,50%	77,48%	76,61%	20m	
		81,14%	82,66%	79,43%	80,31%	81,51%	78,73%	78,50%	79,84%	77,85%	35m	
		81,92%	84,33%	80,63%	81,51%	83,26%	80,12%	80,40%	81,83%	79,15%	50m	
		79,15%	80,63%	77,81%	77,95%	79,29%	77,48%	75,91%	77,85%	76,98%	20m	
		81,83%	83,77%	79,89%	80,95%	82,62%	79,29%	79,15%	80,58%	78,36%	35m	
		82,76%	85,02%	81,32%	82,39%	84,42%	80,58%	80,95%	82,80%	79,80%	50m	

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 34 - Graus-hora de resfriamento para 05 ren/hora.





		GRAUS-HORA CALOR									Diâmetro
		Ø20			Ø30			Ø50			
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Zona
Solo Coberto	Profundidade	578	481	583	616	508	599	659	545	617	Comprimento
		523	425	527	547	446	545	582	480	569	20m
		496	402	487	509	417	503	547	441	531	35m
		479	402	540	520	436	560	577	485	584	50m
		404	330	459	431	352	486	481	401	518	20m
		360	295	407	378	313	428	429	348	469	35m
		463	384	530	500	421	551	568	475	578	50m
		383	315	447	413	338	471	462	383	510	20m
		342	282	394	368	302	415	409	332	456	35m
		431	360	454	455	372	472	490	403	503	50m
		432	362	514	477	397	537	547	457	566	20m
	Solo Descoberto		534	443	564	569	476	581	625	517	602
		468	382	497	491	406	519	537	441	549	50m
		431	360	454	455	372	472	490	403	503	20m
		432	362	514	477	397	537	547	457	566	35m
		348	289	418	379	313	452	436	360	492	50m
		320	262	368	334	277	390	375	307	430	20m
		419	347	504	462	383	527	533	446	561	35m
		331	273	407	360	296	439	422	345	479	50m
		305	249	355	319	260	378	359	292	418	

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

4.3.3 DEZ RENOVAÇÕES POR HORA (10 REN/HORA)

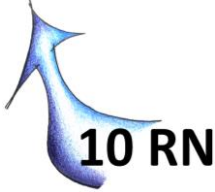







A elevação da taxa de renovação resulta em uma coloração menos homogênea da tabela, devido ao fato de que os dados deixam de ser tão próximos. Por meio da observação dos efeitos expostos na Figura 31, percebem-se entre os melhores índices de conforto valores muito próximos aos 90%.

Figura 35 - Percentuais de horas em conforto para 10 ren/hora.

CONFORTO ADAPTATIVO											
											Diâmetro
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	
Solo Coberto	Profundidade 1,5m	20m									Comprimento
		35m									
		50m									
	3,0m	20m									
		35m									
		50m									
	4,5m	20m									
		35m									
		50m									
	Solo Descoberto	1,5m	20m								
			35m								
			50m								
3,0m		20m									
		35m									
		50m									
4,5m		20m									
		35m									
		50m									

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 36 - Graus-hora de resfriamento para 10 ren/hora.






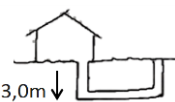




		GRAUS-HORA CALOR									Diâmetro	Zona	
		Ø20			Ø30			Ø50					
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3			
		Profundidade	415	360	531	445	385	541	490	424	557	20m	Comprimento
		324	279	450	351	302	473	398	343	501	35m		
		285	244	388	301	259	407	340	293	441	50m		
		339	290	493	382	326	511	439	374	532	20m		
		238	210	385	269	236	411	320	274	450	35m		
		200	176	313	218	192	334	254	220	375	50m		
		329	283	488	370	318	507	425	365	529	20m		
		224	201	373	255	220	400	309	260	442	35m		
		186	170	302	205	182	325	243	212	366	50m		
			381	331	514	416	360	527	460	401	545	20m	
			285	247	417	317	271	443	362	312	478	35m	
			245	213	352	264	227	375	300	260	410	50m	
		306	264	473	346	300	493	402	350	519	20m		
		203	182	351	231	205	380	285	248	425	35m		
		169	158	279	184	168	302	219	194	343	50m		
		290	254	465	334	290	486	393	342	513	20m		
		190	174	342	218	195	369	272	233	414	35m		
		156	150	263	173	162	285	206	184	330	50m		

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

4.3.4 VINTE RENOVAÇÕES POR HORA (20 REN/HORA)








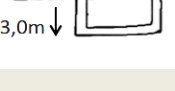


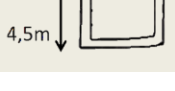


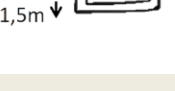


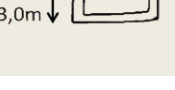
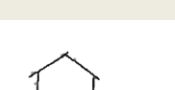


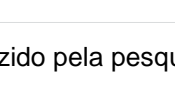
Atingido o limite de renovações estipulados pela pesquisa é possível averiguar percentuais de horas em conforto bastante significativos, inclusive muito superiores aos atingidos no Caso-Base B. Nestas simulações surgiram alguns índices de desconforto por frio, irrelevantes, inferiores a 1%.

Figura 37 - Percentuais de horas em conforto para 20 ren/hora.

CONFORTO ADAPTATIVO													
											Diâmetro		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3		Zona	
Solo Coberto		Profundidade	81,69%	82,20%	78,83%	81,23%	82,34%	79,06%	80,12%	81,32%	78,87%	20m	
			84,70%	85,34%	80,03%	84,00%	84,70%	79,75%	82,62%	83,36%	79,33%	35m	
			87,79%	88,30%	81,14%	86,50%	87,38%	80,58%	84,28%	85,44%	80,31%	50m	
			83,31%	84,05%	79,47%	82,48%	83,36%	79,29%	81,46%	82,57%	79,24%	20m	
			88,30%	88,44%	81,09%	86,78%	87,56%	80,63%	84,51%	85,48%	80,31%	35m	
			91,35%	92,88%	82,99%	91,31%	90,66%	82,39%	88,21%	88,58%	81,69%	50m	
			83,73%	84,23%	79,70%	82,80%	83,59%	79,70%	81,60%	82,85%	79,15%	20m	
			88,90%	89,18%	81,41%	87,29%	88,07%	81,09%	84,88%	85,99%	80,58%	35m	
			93,44%	93,39%	83,50%	91,26%	92,19%	82,85%	88,72%	89,18%	81,83%	50m	
	Solo Descoberto			82,43%	83,08%	79,29%	81,46%	82,39%	79,01%	80,54%	81,60%	78,92%	20m
				86,22%	87,10%	80,49%	84,74%	85,76%	80,17%	83,22%	84,37%	79,84%	35m
				89,00%	90,15%	81,83%	88,12%	88,90%	81,41%	86,08%	87,19%	80,86%	50m
			83,77%	84,97%	79,52%	83,36%	83,96%	79,52%	81,83%	82,71%	79,10%	20m	
			90,11%	89,78%	81,78%	88,44%	88,67%	81,46%	85,95%	86,69%	80,58%	35m	
			94,13%	94,08%	84,23%	93,20%	93,02%	83,54%	89,74%	90,43%	82,62%	50m	
			84,42%	85,07%	79,70%	83,59%	84,28%	79,66%	82,11%	83,13%	79,57%	20m	
			90,94%	90,89%	81,97%	89,14%	89,27%	81,83%	86,41%	87,38%	80,95%	35m	
			95,01%	94,27%	84,70%	93,99%	93,80%	83,77%	90,34%	90,94%	82,71%	50m	

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 38 - Graus-hora de resfriamento para 20 ren/hora.

GRAUS-HORA CALOR												
											Diâmetro	
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3		Zona
Solo Coberto	Profundidade	365	329	514	400	352	518	441	388	523	20m	
		244	228	448	274	249	462	324	289	479	35m	
		187	181	370	206	194	390	248	227	420	50m	
		298	272	492	334	303	499	393	346	509	20m	
		169	170	389	198	189	414	249	229	445	35m	
		125	79	295	91	138	316	172	169	358	50m	
		285	265	488	326	297	498	378	338	506	20m	
		158	160	378	186	181	404	238	220	436	35m	
		70	74	275	129	82	302	160	158	343	50m	
	Solo Descoberto		331	304	503	371	330	511	417	370	517	20m
			208	200	421	239	223	441	289	262	463	35m
			159	153	336	175	167	359	210	198	389	50m
		263	249	482	303	279	489	369	325	503	20m	
		140	146	359	164	167	381	214	204	420	35m	
		65	62	256	71	74	277	142	139	321	50m	
		248	237	476	288	266	485	352	316	498	20m	
		131	129	343	152	155	369	202	195	408	35m	
		53	60	241	63	67	262	135	129	307	50m	

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.4.1 Conforto Adaptativo

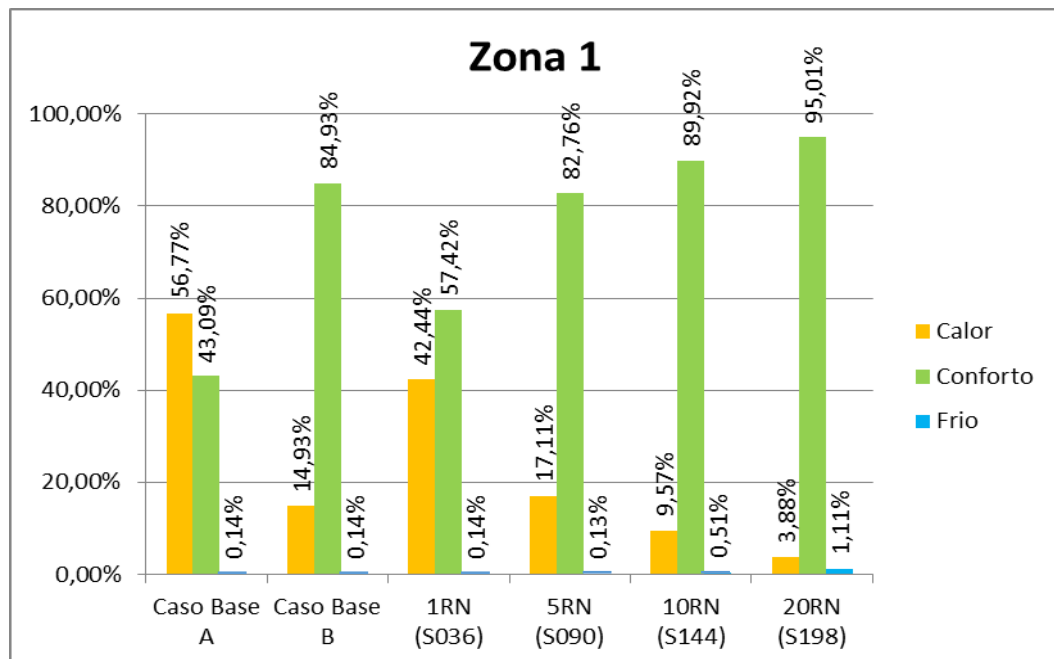
Os gráficos expostos nas Figuras 39, 40 e 41 consistem em comparações entre os resultados de conforto obtidos para o Caso-Base A, para o Caso-Base B e para os melhores índices coletados de cada variação de renovação de ar dos Casos-Referência em cada uma das três zonas. As simulações que apresentaram maior percentual de conforto foram a S036, a S090, a S144 e a S198; cujas propriedades encontram-se sintetizadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Variáveis das simulações selecionadas entre os Casos-referência.

Simulação	Renovações	Solo	Diâmetro	Comprimento	Profundidade
S036	01	Descoberto	Ø 0,20 m	50 m	4,5 m
S090	05				
S144	10				
S198	20				

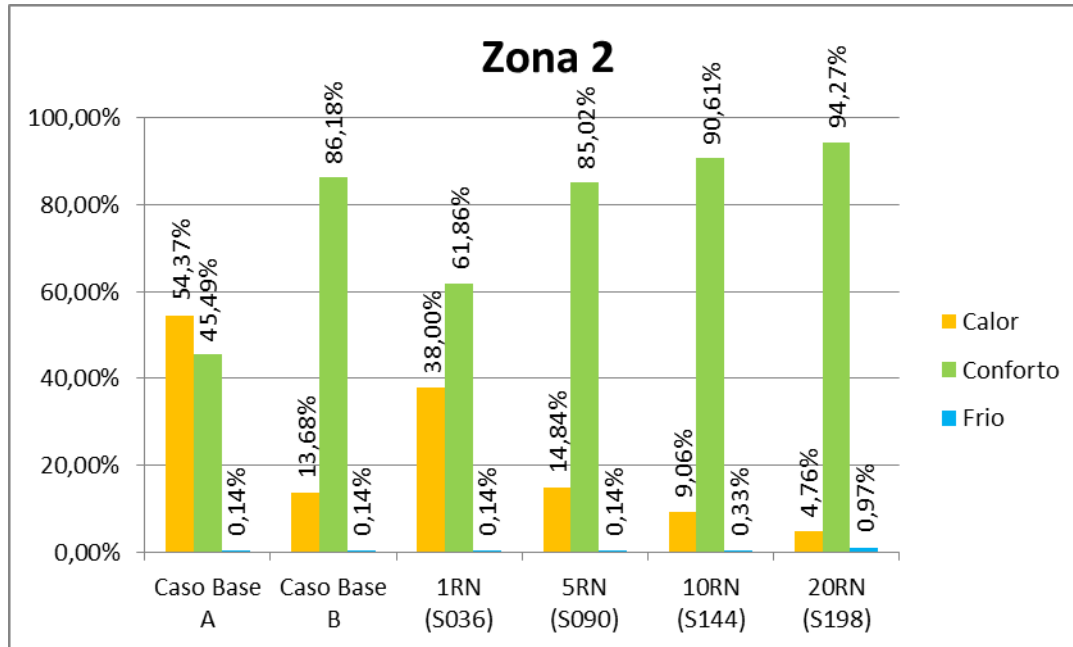
Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 39 – Resumo dos percentuais de conforto para a Zona 1 para o período de dezembro à fevereiro.



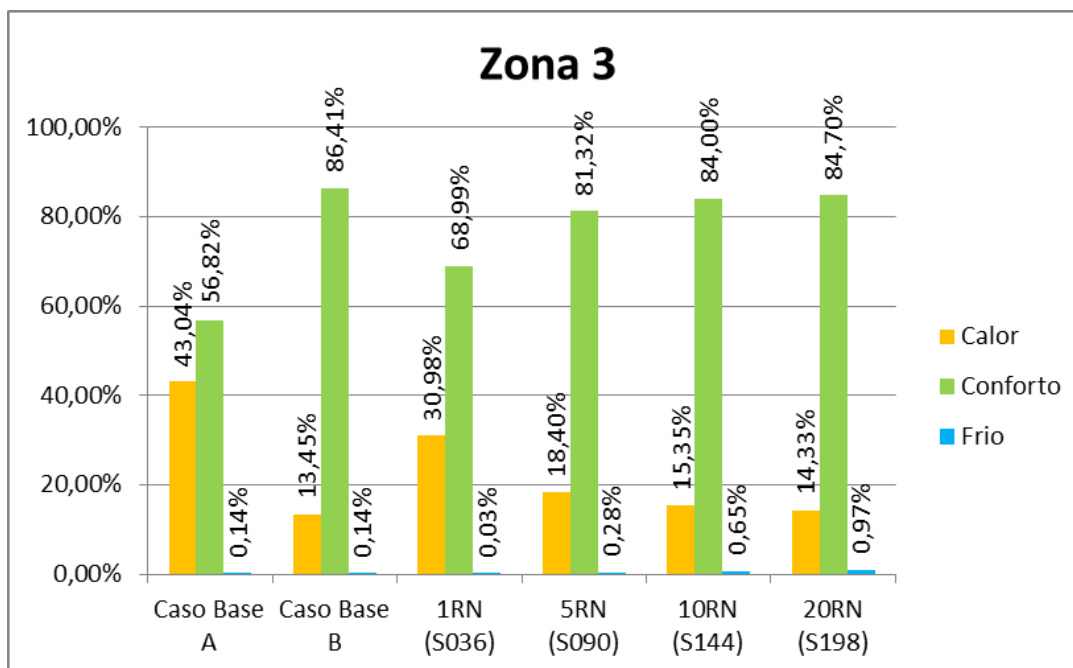
Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 40- Resumo dos percentuais de conforto para a Zona 2 para o período de dezembro à fevereiro.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Figura 41- Resumo dos percentuais de conforto para a Zona 3 para o período de dezembro à fevereiro.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

Assim como observado, as melhores situações dos Casos-Referência ocorreram quando se utilizou o menor diâmetro, o maior comprimento, a maior profundidade e o solo descoberto. Inter-relacionando as simulações nos gráficos, percebe-se a crescente eficácia do sistema de dutos enterrados, sobretudo quando expandidas as trocas de ar.

Com uma renovação por hora, os valores já demonstram uma evolução em relação ao mesmo caso sem a presença de duto (Caso-Base A), porém com valores ainda baixos para os índices de conforto. As simulações configuradas para cinco renovações por hora já chegam muito próximas aos valores obtidos no Caso-Base B, considerados como ideais. Para dez e vinte renovações, as simulações demonstraram percentuais de horas em conforto muito superiores às alcançadas através da ventilação natural calculada.

É interessante analisar os resultados gerados para a Zona 3. Para este ambiente foram registrados menores índices de conforto térmico quando comparado com as Zonas 1 e 2. Este fato ocorre, pois a Zona 3 conta com a maior área em relação às demais, e sua área de superfícies em contato com o exterior, como paredes e cobertura, também é mais elevada.

Ainda acerca da análise de resultados, o estudo objetivou a avaliação da influência de cada uma das variáveis nos indicadores de arrefecimento do sistema de dutos enterrados. A apreciação de cada variável é descrita a seguir.

4.4.1.1 Variação da cobertura do solo

Mesmo que a cobertura do solo não ofereça diferença expressiva em relação às outras variáveis, observou-se que o solo descoberto proporciona melhores resultados. Isso se deve ao fato de que as trocas convectivas de calor da superfície do solo com o ar exterior são facilitadas na ausência de vegetação, que neste caso se comporta como um isolante.

4.4.1.2 Variação das renovações de ar

Como pode ser observado nos infográficos dos Casos-Referência, a variável que mais exerce influência nos resultados é a taxa de renovação do ar, onde os valores de conforto foram crescendo proporcionalmente na medida em que se

aumentaram as renovações. Concomitante a isso, quanto maior foi a taxa de renovação, mais se exageraram as diferenças entre os outros parâmetros.

Buscando melhor elucidar este entendimento, na Figura 42 foram confrontados apenas os dados referentes à Zona 1 e ao solo descoberto, a fim de comparar os resultados das simulações de uma renovação por hora e de vinte renovações por hora. Deste modo, é possível perceber que, com o aumento das renovações, a diferença entre alguns parâmetros aumentaram, principalmente em relação ao diâmetro e ao comprimento.

Figura 42 – Análise comparativa entre 01 ren/hora e 20 ren/hora.

		1 RN			20 RN			
		Ø20	Ø30	Ø50	Ø20	Ø30	Ø50	
Solo Descoberto	1,5m ↓							20m
								35m
								50m
	3,0m ↓							20m
								35m
								50m
	4,5m ↓							20m
								35m
								50m

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

No destaque em vermelho, nota-se uma variação de 0,18% no conforto entre os diâmetros de 0,20 m e 0,50 m para uma renovação por hora. No mesmo intervalo

de diâmetros, quando submetido a vinte renovações por hora, o conforto sofre uma variação de 4,67%.

Quanto ao comprimento, o destaque feito na cor roxa demonstra uma variação de 1,11% entre os 20 e os 50 metros para uma renovação por hora, enquanto o mesmo intervalo sofre uma variação de 10,36% para vinte renovações por hora.

4.4.1.3 *Variação do diâmetro do duto*

Embora o aumento do diâmetro do duto resulte em uma ampliação da superfície de contato e, com isso na área de trocas de calor entre o ar e a parede do duto; o que se observou foi uma redução da eficiência do sistema, proporcionalmente à ampliação da seção do duto. Durante o processo de configuração das simulações, as renovações de ar foram calculadas relacionando o volume do ambiente de cada uma das zonas com o tempo em que deveria ser realizada a troca completa do ar. Conforme se altera o diâmetro do duto, o *software EnergyPlus* faz a compensação na velocidade do fluxo do ar interno ao duto, uma vez já fixada a vazão.

Como já explicado por Frota e Schiffer (2001) na Figura 5 deste trabalho, com o aumento da velocidade do ar, amplia-se o coeficiente convectivo, facilitando as trocas de calor. Por este motivo, com a redução do diâmetro e o aumento da velocidade de escoamento do ar, ampliam-se as trocas térmicas, o que resulta em índices de conforto mais elevados.

4.4.1.4 *Variação do comprimento do duto*

Outro parâmetro que exerceu influência nas horas em conforto foi o comprimento do duto. Quanto maior o comprimento, maiores os índices de conforto. Inclusive, a variação do comprimento demonstra-se mais relevante do que o aumento da profundidade, como explicado no item 4.4.1.5 e através da Figura 42.

O aumento do comprimento também pode ser um recurso para suprir a perda de eficiência do duto em diâmetros maiores, como destacado na Figura 41. Entretanto, deve-se ponderar que esta alternativa pode não ser viável do ponto de

vista econômico, uma vez que a diferença de ganhos no que tange ao conforto térmico é pequena.

Figura 43 – Variação do comprimento em relação ao diâmetro.

CONFORTO ADAPTATIVO											
20 RN	Ø20			Ø30			Ø50			Diâmetro	
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Zona	
Solo Descoberto	1,5m ↓	Comprimento									20m
		82,43%	83,08%	79,29%	81,46%	82,39%	79,01%	80,54%	81,60%	78,92%	35m
		86,22%	87,10%	80,49%	84,74%	85,76%	80,17%	83,22%	84,37%	79,84%	50m
	3,0m ↓	89,00%	90,15%	81,83%	88,12%	88,90%	81,41%	86,08%	87,19%	80,86%	20m
		83,77%	84,97%	79,52%	83,36%	83,96%	79,52%	81,83%	82,71%	79,10%	35m
		90,11%	89,78%	81,78%	88,44%	88,67%	81,46%	85,95%	86,69%	80,58%	50m
	4,5m ↓	94,13%	94,08%	84,23%	93,20%	93,02%	83,54%	89,74%	90,43%	82,62%	20m
		84,42%	85,07%	79,70%	83,59%	84,28%	79,66%	82,11%	83,13%	79,57%	35m
		90,94%	90,89%	81,97%	89,14%	89,27%	81,83%	86,41%	87,38%	80,95%	50m
		95,01%	94,27%	84,70%	93,99%	93,80%	83,77%	90,34%	90,94%	82,71%	

Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

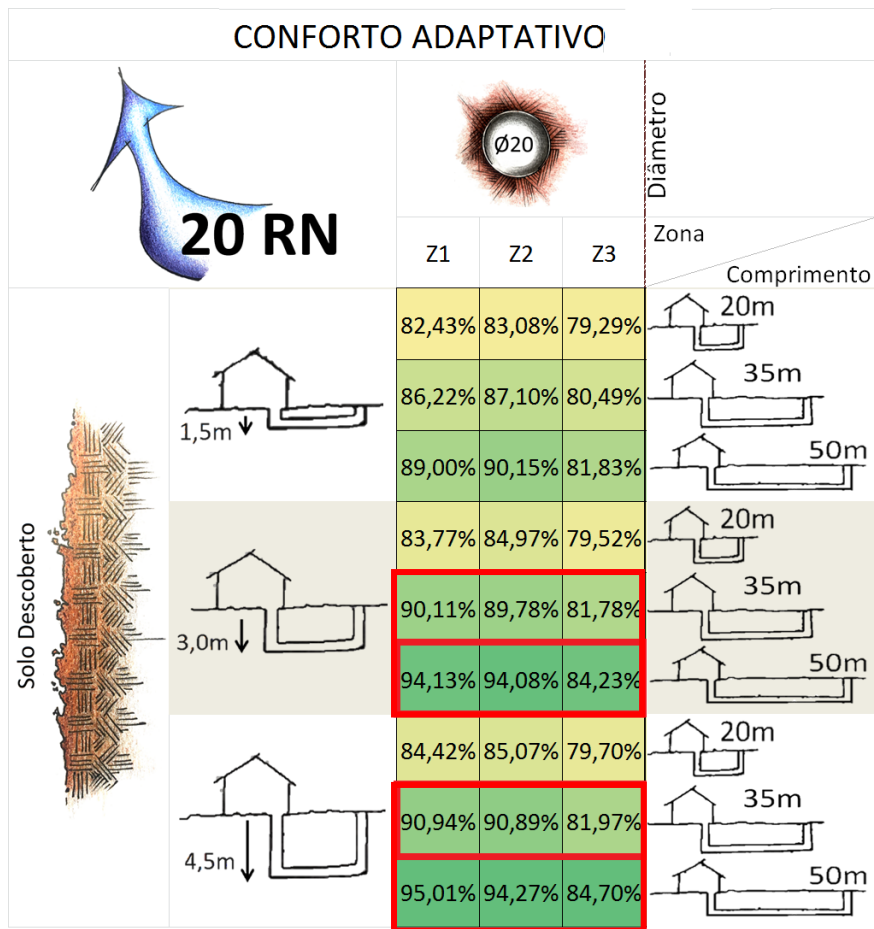
4.4.1.5 Variação da profundidade do duto no solo

Como demonstrado na Figura 44 pelos destaques em vermelho, o aumento do comprimento de 35 para 50 metros, na profundidade de 3 metros, acarreta em um aumento de conforto de 4,02% na Zona 1; 4,30% na Zona 2; e 2,45% na Zona 3. Enquanto isso, o avanço de 3,0 metros de profundidade para 4,5 metros, incide em um aumento de conforto de apenas 0,83% na Zona 1; 1,11% na Zona 2; e 0,19% na Zona 3.

Esses dados demonstram que, embora os resultados sejam mais satisfatórios nas profundidades de 4,5 metros, a diferença é baixa quando comparada com a

profundidade de 3 metros, por exemplo. Isto é, considerando as questões econômicas para a implantação do sistema, o aterramento do duto a uma profundidade de 4,5 metros não demonstra uma medida compensatória, pois os ganhos são mínimos quando equiparados à profundidade de 3,0 metros.

Figura 44 – Variação da profundidade em relação ao comprimento.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

4.4.2 Graus-hora

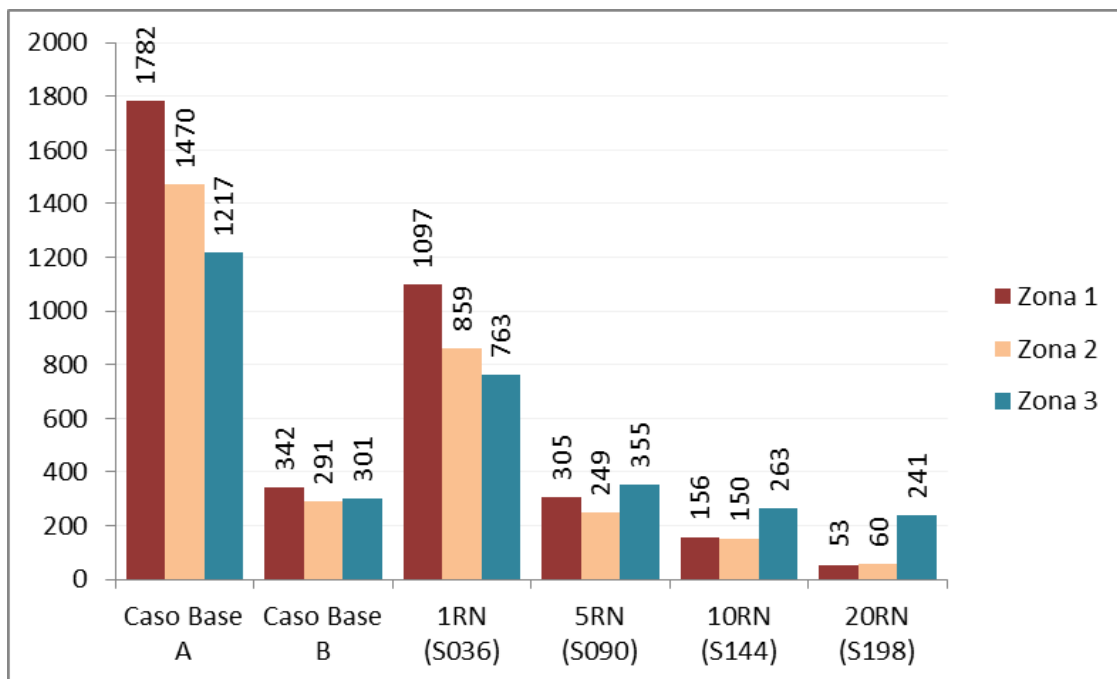
Calculou-se o número de graus-hora para as temperaturas operativas geradas pelas simulações no *EnergyPlus*. A temperatura neutra, calculada através da temperatura média mensal, e somada ao índice de +3,5; geraram uma temperatura operativa interna limite para um índice de aceitabilidade estipulado de 80%.

A pesquisa considerou os resultados para o período de verão, então foram gerados apenas graus-hora de resfriamento, ou seja, graus-hora em desconforto por calor. Os graus-hora de resfriamento consistem na somatória dos graus em que a temperatura operativa horária interna estava acima da temperatura base de conforto. São os graus-hora em que a zona demonstrou necessitar ser resfriada, onde a temperatura interna ficou acima do limite superior aceitável.

Os graus-hora de resfriamento foram calculados a partir dos limites de conforto já ilustrados. Por este motivo, as mesmas variáveis que exerceram influência nos resultados do conforto também interferiram nos dados dos graus-hora.

O gráfico apresentado pela Figura 45 evidencia a redução da quantidade de graus-hora de resfriamento mediante utilização de dutos enterrados e o aumento do número de renovações do referido sistema. O melhor resultado é observado na Zona 1, na configuração denominada S198, de solo sem cobertura vegetal, duto com 0,20 metro de diâmetro, 50 metros de comprimento e enterrado a 4,5 metros de profundidade; onde para vinte renovações por hora, alcançou-se um mínimo de 53 graus-hora de resfriamento.

Figura 45 - Resumo dos graus-hora de resfriamento para as três zonas.



Fonte: (Produzido pela pesquisadora, 2017).

5 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou avaliar o arrefecimento passivo por meio da utilização de dutos enterrados em uma habitação localizada na Zona Bioclimática 2, mais precisamente na cidade de Santa Maria –RS. O estudo também buscou investigar as variáveis do sistema que exercem maior influência nos resultados. Após a modelagem da edificação no programa *EnergyPlus*, foi possível analisar os dados gerados através do número de graus-hora de resfriamento e do conforto adaptativo.

Três zonas de permanência prolongada da edificação foram consideradas. A abordagem ocorreu pela simulação de dois Casos-Base, sem dutos, sendo um deles com ventilação natural calculada; e em relação aos Casos-Referência, cuja combinação das diferentes variáveis rendeu um total de 216 casos, cada um com um arranjo diferente de duto enterrado. Os resultados obtidos com base nas simulações computacionais evidenciaram que a utilização da ventilação natural através de dutos subterrâneos se mostrou benéfica no tocante ao arrefecimento passivo da edificação em estudo.

A partir das diversas combinações de geometrias de dutos enterrados, se puderam observar melhores efeitos quando utilizados os menores diâmetros, os maiores comprimentos, as maiores profundidades, o maior número de renovações e o solo descoberto. Em diâmetros menores, aumenta-se a velocidade do escoamento de ar, o que resulta em uma ampliação do coeficiente convectivo e, portanto, contribui para o aumento de trocas de calor entre o ar e o solo. O comprimento do duto também é um fator importante no que tange ao favorecimento das trocas térmicas, pois, quando variado para maiores dimensões, proporciona um aumento da superfície de contato e permite que o ar perca mais calor à medida que avança edificação adentro.

Dentre as considerações mais relevantes é essencial observar a influência do número de renovações. A variação do índice de trocas de ar não só se mostrou favorável à elevação dos níveis de conforto, como também interviu nos resultados de outros parâmetros. Em relação ao comprimento, enquanto em uma renovação por hora a diferença de horas em conforto foi de cerca de 1 a 2% em relação à variação do comprimento de 20 metros para 50 metros; quando se elevou a taxa de trocas para vinte renovações por hora, no mesmo intervalo de comprimentos, a diferença de horas em conforto se elevou para cerca de 7 a 10%. Do mesmo modo, no tocante

ao diâmetro, a alternância do número de renovações, demonstrou que o índice de conforto entre os 20 e 50 centímetros de diâmetro para uma renovação foi cerca 0,2 a 0,5%; e de 2 a 5% no mesmo intervalo de diâmetros para vinte renovações.

Em relação à profundidade, constatou-se que com o aumento da mesma, também crescem os níveis de conforto, sendo esse acréscimo, entretanto, inferior a 1%. É conveniente que se analise este fato pelo viés econômico de execução, uma vez que a escavação de mais um metro e meio de profundidade para posicionar o duto, como é o caso, geraria mais custos e tempo para instalação do sistema, não acarretando em ganhos consideráveis do ponto de vista do conforto térmico.

Portanto, após a observação e avaliação crítica dos resultados, foi possível eleger uma combinação de variáveis de duto enterrado considerada indicada pela proporção dos altos índices de conforto e do baixo número de graus-hora de resfriamento. A simulação chamada de “S197” cujas variáveis são: diâmetro de 0,20 m, 50 metros de comprimento, profundidade de aterramento do duto de 3,0 metros, com vinte renovações por hora e com o solo descoberto de vegetação; foi elencada como a situação mais vantajosa. Este arranjo proporcionou para a Zona 1, 94,13% de conforto térmico e 65 graus-hora de resfriamento; para a Zona 2, 94,08% de conforto térmico e 62 graus-hora de resfriamento; e para a Zona 3, 84,23% de conforto térmico e 256 graus-hora de resfriamento.

Uma segunda combinação, com menor comprimento de duto pode ser indicada, a fim de reduzir os custos de implantação ou caso as dimensões disponíveis no terreno não favoreçam grandes comprimentos de duto. A simulação “S194” possui os parâmetros iguais à citada anteriormente, com exceção da redução do comprimento do duto para 35 metros. Esta combinação gerou para a Zona 1, 90,11% de conforto térmico e 140 graus-hora de resfriamento; para a Zona 2, 89,78% de conforto térmico e 146 graus-hora de resfriamento; e para a Zona 3, 87,78% de conforto térmico e 359 graus-hora de resfriamento.

Ambos os arranjos indicados superam os índices alcançados pelo Caso-Base B, que envolveu uma ventilação calculada. A referida ventilação do Caso-Base B, considera que sempre que a temperatura interna excede um limite de 25° C, as janelas e portas são abertas de modo a favorecer a ventilação natural. Este caso é considerado como um sistema utópico e automatizado, uma vez que essa abertura consciente de esquadrias em relação à temperatura dificilmente aconteceria em situações reais. Isto é, a utilização de dutos enterrados, mesmo sem considerar os

melhores resultados obtidos pela pesquisa e adotando configurações mais simples de serem implantadas, superam o estipulado como ventilação ideal.

Desta forma, considera-se que os objetivos iniciais elencados pela pesquisa foram atendidos. Além disso, levantaram-se outros esclarecimentos acerca do processo de funcionamento do sistema. A utilização de dutos enterrados se mostrou eficiente no que se refere ao arrefecimento passivo de edificações, podendo ser utilizada como estratégia bioclimática para condicionamento térmico. Como já comprovado pelos resultados e pela revisão de literatura, este princípio pode ser utilizado em conjunto com outras estratégias de maneira a ampliar a eficiência energética de edificações, atendendo aos preceitos do desenvolvimento sustentável. Pesquisas como esta são relevantes no sentido de promover entendimentos por parte de projetistas e profissionais da área da construção civil, em especial no subsídio para especificações técnicas e indicações destes métodos aos clientes.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, pode ser realizada uma série de estudos em torno desta temática, entre eles, sugere-se:

- Analisar a aplicação do sistema para os meses mais frios, considerando o aquecimento;
- Simular outras variáveis, como diferentes materiais ou arranjos de vários dutos;
- Calcular a economia em condicionamento térmico de modo a gerar um período determinado em que o investimento inicial seria quitado;
- Considerar diferentes ambientes, alterando envelope, orientação solar e área das zonas térmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABESCO. **O que é eficiência energética?** Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220**. Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15.220**. Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 71 p.

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE SANTA MARIA. **Santa Maria em dados**. Disponível em: <<http://santamariaemdados.com.br/1-aspectos-gerais/1-2-localizacao/>>. Acesso: 07 mai. 2017.

ADENE. **Guia da eficiência energética**. 4 ed. [S.l.: s.n.], 2013.

ARBOIT, Nathana Karina Swarowski *et al.* **Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil**: uma revisão de literatura. Revista do Departamento de Geografia – USP, São Paulo, v. 26, p. 155-168, 2013.

ARGENTINA. Secretaria de energia. **Energia geotérmica**. Disponível em: <https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2017.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE STANDARD 55 – 2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Eficiência energética na indústria e nas residências**. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano nacional de eficiência energética**: premissas e diretrizes básicas. [S.l.: s.n.], 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Guia prático de eficiência energético**. Brasília: [s.n.]. 2014.

CÂNDIDO, Christhina. **Ventilação natural e conforto térmico em climas quentes**. Florianópolis, UFSC, Lab EEE, 2006. 49 p. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Topicos>

%20Avan%C3%A7ados%20em%20Conforto%20T%C3%A9rmico%20-%20Christina.pdf> . Acesso em: 09 jul. 2017.

CBIC. CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013. Disponível em: <http://www.cbic.org.br/arquivos/guia_livro/Guia_CBIC_Norma_Desempenho_2_edicao.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2017.

CHIARELLO, Julianna Ana. **Ventilação natural por efeito chaminé** – estudo em modelo reduzido de pavilhões industriais. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CIBSE. **Environmental design**, CIBSE Guide A, 7ª ed., Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2006.

CORBELLA, Oscar; CORNER, Viviane. **Manual de Arquitetura Bioclimática Tropical**. Rio de Janeiro: Revan, 2011.

COSTA, E. C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. São Paulo: Blucher, 1982.

_____. **Ventilação**. 1. ed. São Paulo: E. Blücher, 2005.

De DEAR, R.; BRAGER, G.S., **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. ASHRAE Trans., V.104(1a), pp. 145-167, 1998.

ELEKTRO. *et al.* **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. Campinas: [s.n.]. 2012.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Input and Output Reference, EnergyPlus Version 8.3.**, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2015.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2014**: Ano base 2013 / – Rio de Janeiro : EPE, 2014.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort – analysis and application in environmental engineering**. Nova York: McGraw-Hill, 1970. 244 p.

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

FRANÇA, S. R. P. **Simulação visando a ventilação de residências através de tubos enterrados**. 2011. 26 p. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. **Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines**. Energy and Buildings, v.18, 1992.

GOLDEMBERG, José. **Energia e sustentabilidade**. Revista de Cultura e Extensão Universitária USP, São Paulo, n. 14, p. 33-43, nov. 2015.

GURGEL, M. **Design Passivo- baixo consumo energético**: guia para conhecer, entender e aplicar os princípios do design passivo em residências. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2012.

HEYWOOD, H. **101 regras básicas para uma arquitetura debaixo consumo energético**. São Paulo: Gustavo Gili, 2015.

HUMPHREYS, M. A., Field studies of thermal comfort compared and applied. In: **Building Research Establishment Current Paper**. 1975. Watfort. UK.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução e Revisão Técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 161-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R**. Eletrobrás, 2012.

_____. **Portaria n. 050/2013**: Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas De Paredes, Coberturas E Vidros. INMETRO, 2013. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos_rac/AnexoV.pdf> . Acesso em: 09 jul. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 7730**: Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of Conditions for Thermal Comfort. Geneva, 1994.

_____. **ISO 7730**: Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. Geneve, 2005.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Tradução técnica de Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. Eletrobrás/Procel, Rio de Janeiro, 2014.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de Edificações: Aula 2 Conforto Térmico**. UFSC, Florianópolis, [20--]

LAMBERTS, Roberto; XAVIER, Antônio A. **Conforto térmico e estresse térmico**. Florianópolis, UFSC, Lab EEE, 2002. 108 p. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4200_apostila%202011.pdf> . Acesso em: 09 jul. 2017.

LEE, Kwang Ho; STRAND, Richard K. **Implementation of an Earth Tube System Into Energyplus Program**. Illinois, USA, 2006. Disponível em:<https://www.ibpsa.us/sites/default/files/publications/SB06_058_066_revised.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2017.

MARTINS, David; RAU, Sabrina; RECKZIEGEL, Simone; FERRUGEM, Anderson; SILVA, Antônio César. **Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações**. ENCAC 2009, Natal, RN.

MASCARÓ, Lúcia R. **Energia na Edificação – Estratégias para minimizar seu consumo**. São Paulo, Projeto, 1991.

MELO, Ana Paula; WESTPHAL, Fernando Simon; MATOS, Michele. **Apostila do Curso Básico do Programa Energyplus**. Florianópolis, UFSC, Lab EEE, 2009. 24 p. Disponível em:<http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf> Acesso em: 09 jul. 2017.

MÜLLER, D.G. **Arquitetura ecológica**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2011.

MUSSKOPF, Diego Boschetti. **Estudos Exploratórios sobre Ventilação Natural por Tubos Enterrados**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NETO, A. H., VOLTANI, E. R. **Resfriamento e aquecimento geotérmico**. (2013) Disponível em:<<http://www.engenhariaearquitectura.com.br/noticias/883/Resfriamento-e-aquecimentogeotermico.aspx>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 1 ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1963.

OLIVEIRA, Liader da Silva. **Avaliação dos Limites das Propriedades Térmicas dos Fechamentos Opacos da NBR 15220-3, para Habitações de Interesse Social, da Zona Bioclimática 2**. 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

OLIVEIRA, Liader da Silva; SILVA, Antônio César Silveira Baptista da; CUNHA, Eduardo Grala da. **Análise das Condições de Conforto Térmico em Habitações de Interesse Social na Região Sul do RS**. São Paulo: Nutau, 2010. 10p. Disponível em:<https://www.usp.br/nutau/sem_nutau_2010/metodologias/cunha_eduardo_grala_da_1.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2017.

PEDOTE, Lucas. FRANCO, Thiago Teixeira. **Análise da Eficiência Térmica de Diferentes Tipos de Coberturas para Casas de Emergência**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

RODRIGUEZ, Hugo Ariel Lombardi. **Simulação Numérica da Transferência Simultânea de Energia e Umidade Através do Solo em um Sistema Trocador-Armacenador de Calor**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROMÉRO, M.A; REIS, L.B. **Eficiência energética em edifícios**. Barueri, SP: Manole, 2012.

RORIZ, Maurício. **Apostila de Conforto e Desempenho Térmico das Edificações**. UFSCar, São Carlos, 2008.

SILVA, Joaquim Mayer Botelho da. **A ventilação natural como melhoria do desempenho energético de edifícios residenciais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa – Portugal.

SOARES, Maicon Motta. **Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15575/2013: Habitações de Interesse Social na Zona Bioclimática 2**. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

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

SOUSA, E.C. **Aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português**. 2014. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Minho, Portugal.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Apostila Hiperlivro EtiquEEE**. 4 ed. Florianópolis, 2014.

_____. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados**. 2011. 237 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. **Tutorial OpenStúdio 1.0**: plugin do EnergyPlus para Sketchup. Florianópolis: LabEEE, 2010. 20 p. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_OpenStudio.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2017

APÊNDICES

APÊNDICE A – COMBINAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DO DUTO (1 RN)

SIMULAÇÃO	RENOVAÇÕES	TIPO DE SOLO	DIÂMETRO	COMPRIMENTO	PROFUNDIDADE	
S001	1	Coberto	0,20 m	20 m	1,50m	
S002					3,00m	
S003					4,50m	
S004				35 m	1,50m	
S005					3,00m	
S006					4,50m	
S007				50 m	1,50m	
S008					3,00m	
S009					4,50m	
S010				0,30 m	20 m	1,50m
S011			3,00m			
S012			4,50m			
S013			35 m		1,50m	
S014					3,00m	
S015					4,50m	
S016			50 m		1,50m	
S017					3,00m	
S018					4,50m	
S019			0,50 m		20 m	1,50m
S020				3,00m		
S021				4,50m		
S022				35 m	1,50m	
S023					3,00m	
S024					4,50m	
S025				50 m	1,50m	
S026					3,00m	
S027					4,50m	
S028				Descoberto	0,20 m	20 m
S029			3,00m			
S030			4,50m			
S031		35 m	1,50m			
S032			3,00m			
S033			4,50m			
S034		50 m	1,50m			
S035			3,00m			
S036			4,50m			
S037		0,30 m	20 m			1,50m
S038					3,00m	
S039					4,50m	
S040			35 m		1,50m	
S041					3,00m	
S042					4,50m	
S043			50 m		1,50m	
S044					3,00m	
S045					4,50m	
S046			0,50 m		20 m	1,50m
S047		3,00m				
S048		4,50m				
S049		35 m			1,50m	
S050					3,00m	
S051					4,50m	
S052		50 m			1,50m	
S053					3,00m	
S054					4,50m	

APÊNDICE B – COMBINAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DO DUTO (5 RN)

SIMULAÇÃO	RENOVAÇÕES	TIPO DE SOLO	DIÂMETRO	COMPRIMENTO	PROFUNDIDADE	
S055	5	Coberto	0,20 m	20 m	1,50m	
S056					3,00m	
S057					4,50m	
S058				35 m	1,50m	
S059					3,00m	
S060					4,50m	
S061				50 m	1,50m	
S062					3,00m	
S063					4,50m	
S064			0,30 m	20 m	1,50m	
S065					3,00m	
S066					4,50m	
S067				35 m	1,50m	
S068					3,00m	
S069					4,50m	
S070				50 m	1,50m	
S071					3,00m	
S072					4,50m	
S073			0,50 m	20 m	1,50m	
S074					3,00m	
S075					4,50m	
S076				35 m	1,50m	
S077					3,00m	
S078					4,50m	
S079				50 m	1,50m	
S080					3,00m	
S081					4,50m	
S082			Descoberto	0,20 m	20 m	1,50m
S083						3,00m
S084						4,50m
S085					35 m	1,50m
S086						3,00m
S087	4,50m					
S088	50 m	1,50m				
S089		3,00m				
S090		4,50m				
S091	0,30 m	20 m		1,50m		
S092				3,00m		
S093				4,50m		
S094		35 m		1,50m		
S095				3,00m		
S096				4,50m		
S097		50 m		1,50m		
S098				3,00m		
S099				4,50m		
S100	0,50 m	20 m		1,50m		
S101				3,00m		
S102				4,50m		
S103		35 m		1,50m		
S104				3,00m		
S105				4,50m		
S106		50 m		1,50m		
S107				3,00m		
S108				4,50m		

APÊNDICE C – COMBINAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DO DUTO (10 RN)

SIMULAÇÃO	RENOVAÇÕES	TIPO DE SOLO	DIÂMETRO	COMPRIMENTO	PROFUNDIDADE
S109	10	Coberto	0,20 m	20 m	1,50m
S110					3,00m
S111					4,50m
S112				35 m	1,50m
S113					3,00m
S114					4,50m
S115				50 m	1,50m
S116					3,00m
S117					4,50m
S118			0,30 m	20 m	1,50m
S119					3,00m
S120					4,50m
S121				35 m	1,50m
S122					3,00m
S123					4,50m
S124				50 m	1,50m
S125					3,00m
S126					4,50m
S127		0,50 m	20 m	1,50m	
S128				3,00m	
S129				4,50m	
S130			35 m	1,50m	
S131				3,00m	
S132				4,50m	
S133			50 m	1,50m	
S134				3,00m	
S135				4,50m	
S136		Descoberto	0,20 m	20 m	1,50m
S137					3,00m
S138					4,50m
S139				35 m	1,50m
S140					3,00m
S141	4,50m				
S142	50 m			1,50m	
S143				3,00m	
S144				4,50m	
S145	0,30 m		20 m	1,50m	
S146				3,00m	
S147				4,50m	
S148			35 m	1,50m	
S149				3,00m	
S150				4,50m	
S151			50 m	1,50m	
S152				3,00m	
S153				4,50m	
S154	0,50 m	20 m	1,50m		
S155			3,00m		
S156			4,50m		
S157		35 m	1,50m		
S158			3,00m		
S159			4,50m		
S160		50 m	1,50m		
S161			3,00m		
S162			4,50m		

APÊNDICE D – COMBINAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DO DUTO (20 RN)

SIMULAÇÃO	RENOVAÇÕES	TIPO DE SOLO	DIÂMETRO	COMPRIMENTO	PROFUNDIDADE	
S163	20	Coberto	0,20 m	20 m	1,50m	
S164					3,00m	
S165					4,50m	
S166				35 m	1,50m	
S167					3,00m	
S168					4,50m	
S169				50 m	1,50m	
S170					3,00m	
S171					4,50m	
S172			0,30 m	20 m	1,50m	
S173					3,00m	
S174					4,50m	
S175				35 m	1,50m	
S176					3,00m	
S177					4,50m	
S178				50 m	1,50m	
S179					3,00m	
S180					4,50m	
S181			0,50 m	20 m	1,50m	
S182					3,00m	
S183					4,50m	
S184				35 m	1,50m	
S185					3,00m	
S186					4,50m	
S187				50 m	1,50m	
S188					3,00m	
S189					4,50m	
S190			Descoberto	0,20 m	20 m	1,50m
S191						3,00m
S192						4,50m
S193					35 m	1,50m
S194						3,00m
S195	4,50m					
S196	50 m	1,50m				
S197		3,00m				
S198		4,50m				
S199	0,30 m	20 m		1,50m		
S200				3,00m		
S201				4,50m		
S202		35 m		1,50m		
S203				3,00m		
S204				4,50m		
S205		50 m		1,50m		
S206				3,00m		
S207				4,50m		
S208	0,50 m	20 m	1,50m			
S209			3,00m			
S210			4,50m			
S211		35 m	1,50m			
S212			3,00m			
S213			4,50m			
S214		50 m	1,50m			
S215			3,00m			
S216			4,50m			

