

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Samuel Nunes Doege

**USO DA INÉRCIA TÉRMICA DO SOLO PARA O CONFORTO
HIGROTÉRMICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS
UNIFAMILIARES**

Porto Alegre
Fevereiro de 2024

SAMUEL NUNES DOEGE

**USO DA INÉRCIA TÉRMICA DO SOLO PARA O CONFORTO
HIGROTÉRMICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS
UNIFAMILIARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luis Carlos Bonin

Porto Alegre
Fevereiro de 2024

SAMUEL NUNES DOEGE

**USO DA INÉRCIA TÉRMICA DO SOLO PARA O CONFORTO
HIGROTÉRMICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS
UNIFAMILIARES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luis Carlos Bonin (CPGEC/UFRGS)

Engenheiro Civil (M. Eng.) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Fernanda Lamego Guerra (PPGCI/UFRGS)

Arquiteta e Urbanista (D. Eng.) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Enga. Caroline Giordani (PPGEC/UFRGS)

Engenheira Civil (M. Eng.) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais Carlos Ernesto Doege e Andréa Nunes Doege, pela educação que me deram e pelo apoio e incentivo durante minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente a Deus, pela ajuda ao longo de toda esta jornada; por ter andado ao meu lado, em cada um dos “montes e vales” que atravessei; por ter sido o Consolador nos momentos de desespero; por ter me segurado pela mão nos momentos em que estava quase desfalecendo; por ter me carregado em Seus braços nos trechos mais difíceis. Sou grato a Ele por ter colocado em minha vida, os familiares e amigos tão preciosos que tenho.

Agradeço aos meus pais, aos meus irmãos e a toda a minha família, pelo apoio, tanto financeiro quanto emocional, ao longo desta jornada; por terem me “emprestado” seus ouvidos e corações em muitos dos momentos difíceis nos quais precisei desabafar.

Sou grato à minha namorada, Micheli, uma joia rara, a qual tenho o privilégio de envolver em meus braços. Fazer parte de sua vida é como estar em um jardim regado e cuidado por Deus; a cada dia, enquanto passeio por ele, me deleito com toda a beleza e doçura que encontro.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho, Lucas e Bruna. Meu agradecimento especial ao meu chefe, João Paulo, muito mais do que um chefe, um verdadeiro amigo e exemplo a ser seguido, não apenas na profissão, mas na integridade e no modo de viver. Vocês são pessoas maravilhosas.

Sou grato ao meu professor orientador Luis Carlos Bonin, por todo o seu empenho, paciência e excelência como orientador. Agradeço por ter sido o protagonista de todas as boas memórias que guardo dos semestres nos quais fui seu aluno. Não tenho dúvidas de que o senhor ama o que faz, pois o faz com muita dedicação.

Agradeço aos meus amigos que têm tornado ainda mais alegres os bons momentos de minha vida e com quem sempre pude contar nos momentos ruins. Muitos de vocês já são mais do que irmãos para mim.

Sou grato aos meus professores, colegas de curso, e a todos os que participaram, incentivaram e contribuíram para a minha formação acadêmica.

*“Mas a vereda dos justos é como a luz da aurora, que vai
brilhando mais e mais até ser dia perfeito.”*

(Provérbios 4,18)

RESUMO

O uso da inércia térmica do solo para o conforto higrotérmico foi praticado por diversos povos da antiguidade, tendo sido utilizada por nossos ancestrais em suas casas, total ou parcialmente enterradas, como uma forma instintiva de se proteger da hostilidade do clima das regiões em que habitavam. A sociedade humana atual, com a tecnologia e o conhecimento avançados que possui, permite abandonar o empirismo e adotar soluções de engenharia mais precisas e eficazes para esta problemática, como é o caso de alguns tipos de trocadores de calor geotérmico. O objetivo deste trabalho foi demonstrar a viabilidade técnica do aproveitamento da inércia térmica do solo por meio de um Trocador de Calor do tipo Solo-Ar para o conforto higrotérmico em residências unifamiliares por meio de seu projeto e dimensionamento. Sistemas desse tipo consistem basicamente em um conjunto de tubos enterrados, no interior dos quais se faz circular ar. Em dias quentes o substrato é fresco; em dias frios, é morno, sendo intrínseco ao solo ter uma menor amplitude térmica a maiores profundidades, devido à elevada inércia térmica que possui. Dessa forma, é possível regular a temperatura do ambiente edificado, por meio das trocas de calor que ocorrem entre o solo, as paredes dos tubos e o ar, como uma estratégia de resfriamento ou aquecimento natural. No trabalho foi apresentado um equacionamento simples do ponto de vista dos dados de entrada do problema, sendo necessárias somente informações referentes ao clima e ao solo da região, as quais foram utilizadas para mensurar a temperatura do ar de entrada e a temperatura das paredes dos tubos do trocador de calor. A temperatura do ar de saída foi determinada a partir da definição de conforto térmico humano, a vazão mássica do ar foi quantificada a partir de critérios de renovação do ar para edificações e o dimensionamento do diâmetro e do comprimento total dos tubos foi feito por meio das equações apresentadas. O dimensionamento do Trocador de Calor Solo-Ar do Projeto Demonstrativo mostrou que, com apenas 15 m de tubulação de diâmetro nominal $DN = 5''$, foi possível condicionar uma área construída superior a 270 m². Evidenciou-se que, além de tecnicamente viáveis, trocadores de calor solo-ar são sistemas simples e robustos e, como consomem pouca energia elétrica, podem funcionar ininterruptamente, fazendo, simultaneamente, o condicionamento e a renovação/higiene do ar, contribuindo tanto para a eficiência energética quanto térmica das edificações.

Palavras-chave: Trocador de Calor Geotérmico. Projeto e Dimensionamento de Trocador de Calor Geotérmico. Inércia Térmica do Solo. Eficiência Energética das Edificações. Eficiência Térmica das Edificações. Sustentabilidade. Condicionamento do ar. Ar Condicionado Natural.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira no ano de 2023	14
Figura 2 – Geração de energia elétrica no Brasil ao longo da última década.....	14
Figura 3 – Zona de conforto térmico	24
Figura 4 – Zona de inércia térmica em edificações	25
Figura 5 – Extremos das temperaturas mínimas e máximas para quatro cidades brasileiras: Brasília, São Paulo, Rio de Janeiro e Recife	28
Figura 6 – Extremos das temperaturas diárias para Florianópolis e Porto Alegre	29
Figura 7 – Casa protegida por bancos de terra para climas áridos	30
Figura 8 – Dutos enterrados, no interior dos quais ocorrem as trocas de calor.....	32
Figura 9 – Sistema aberto de captação utilizando dois poços	35
Figura 10 – Sistema aberto de captação, utilizando apenas um poço.....	36
Figura 11 – Sistema fechado, com captação horizontal	36
Figura 12 – Sistema fechado, com captação vertical.....	37
Figura 13 – Variações de trocadores de calor do tipo solo-ar na configuração aberta.....	39
Figura 14 – Calor armazenado no solo em função da velocidade de escoamento do ar	50
Figura 15 – Extremos das temperaturas diárias em Porto Alegre/RS durante um ano típico ..	52
Figura 16 – Calor armazenado no solo em função do teor de umidade	54
Figura 17 – Resultados medidos (símbolos) e calculados (linhas) para: a) temperatura do solo e b) conteúdo de umidade do solo	56
Figura 18 – Curva ideal anual e diária de temperatura do solo e do ar	56
Figura 19 – Temperatura e umidade do solo após: a) 48 horas e b) 64 horas da instalação do sistema de tubos.....	58
Figura 20 – Variação da temperatura de saída em função do raio da tubulação	60
Figura 21 – Gráfico do calor armazenado em função do comprimento do tubo para: a) diâmetro de 0,1 m e b) diâmetro de 0,2 m	61
Figura 22 – Variação da temperatura de saída do tubo em função de seu comprimento, na estação de verão em Porto Alegre	62
Figura 23 – Variação da temperatura de saída do tubo em função de seu comprimento, na estação de inverno em Porto Alegre	62
Figura 24 – Calor armazenado no solo em função da distância entre os eixos dos tubos (d) ..	63

Figura 25 – Distanciamento ideal entre tubos para a situação de: a) pré-aquecimento e b) pré-refrigeração e das temperaturas máxima, mínima e interna	64
Figura 26 – Vista em perspectiva da casa.....	71
Figura 27 – Temperatura média horária em Porto Alegre.....	74
Figura 28 – Temperaturas máximas e mínimas médias em Porto Alegre	74
Figura 29 – Representação senoidal da variação das temperaturas diárias do mês de janeiro em Porto Alegre.....	75
Figura 30 – Filtro de entrada do trocador de calor	85
Figura 31 – Desenho esquemático da tubulação na configuração em série	86
Figura 32 – Escavação para sistema em série (esquerda) e vala para tubo isolado (direita)....	87
Figura 33 – Vista em perspectiva do trocador de calor com representação da vala a ser aberta	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Áreas, volumes e outras informações relacionadas à residência unifamiliar	70
Quadro 2 – Perfil do solo utilizado.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do clima de seis cidades brasileiras.....	27
Tabela 2 – Amplitudes térmicas e temperaturas médias anuais de cidades brasileiras	51
Tabela 3 – Variação da temperatura de acordo com a profundidade do solo.....	57
Tabela 4 – Valores de temperatura obtidos pelo formato senoidal	76
Tabela 5 – Dados técnicos dos tubos metálicos tipo <i>Schedule</i> da série Normal	78
Tabela 6 – Parâmetros de entrada para o dimensionamento	79
Tabela 7 – Dados de saída de dimensionamento do trocador de calor solo-ar.....	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANVISA – Agência Nacional De Vigilância Sanitária

NBR – Norma Brasileira

NR – Norma Regulamentadora

PMV – *Predicted Mean Vote* (Voto Médio Predito)

NSPT – *Number of blow counts from Standard Penetration Tests* (Número de contagens de golpes em Testes Padrão de Penetração)

NTU – *Number of Transfer Units* (Número de Unidades de Transferência)

SPT – *Standard Penetratin Test* (Teste Padrão de Penetração)

TRNSYS – *Transient System Simulation Tool* (Ferramenta de Simulação de Sistema Transitório)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área de transferência de calor (m^2)

cp_{ar} – calor específico do ar ($J/kg\cdot K$)

D – diâmetro do tubo (m)

DN – diâmetro nominal (m)

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

h – coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2\cdot K$)

H – altura de elevação/carga (m)

k – coeficiente de perda de carga localizada (adimensional)

L – comprimento do tubo (m)

\dot{m}_{ar} – vazão mássica do ar (kg/s)

Nu – número de Nusselt (adimensional)

NTU – número de unidades de transferência (adimensional)

NV – nível

\dot{Q} – taxa de transferência de calor (W)

sen – seno

P_h – potência hidráulica (W)

T – temperatura

$T_{ar,e}$ – temperatura do ar de entrada ($^{\circ}C$);

$T_{ar,s}$ – temperatura do ar de saída desejada após o trocador de calor ($^{\circ}C$)

T_{solo} – temperatura do solo ($^{\circ}C$)

$T_{m\acute{a}x}$ – temperatura máxima

$V_{m\acute{e}d}$ – temperatura média

$T_{m\acute{i}n}$ – temperatura mínima

V – velocidade de escoamento do ar (m/s)

V_{ar} – velocidade de escoamento do ar (m/s)

\dot{V} – vazão volumétrica (m³/s)

Y – amplitude térmica (C)

ΔP – perda de carga (Pa)

ΔP_L – perda de carga localizada (Pa)

ΔT_{lm} – diferença de temperatura média logarítmica (C)

ΔT – variaao da temperatura (C)

ε – eficácia do sistema (adimensional)

ξ – frequência natural amortecida (adimensional)

λ – condutividade térmica (W/mK)

ν – viscosidade cinemática (m²/s)

ρ – massa específica (kg/m³)

\emptyset – diâmetro (m)

π – número Pi (aproximadamente 3,14, adimensional)

Pr – número de Prandtl (adimensional)

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	18
2.2	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	18
2.3	PREMISSAS E PRESSUPOSTOS	18
2.4	LIMITAÇÕES E DELIMITAÇÕES	19
2.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INÉRCIA TÉRMICA	21
3.2	CLIMA	26
3.3	INÉRCIA TÉRMICA SUPERFICIAL DO SOLO	29
3.3.1	Energia geotérmica	34
3.3.2	Bombas de calor geotérmico	35
3.3.3	Trocador de calor do tipo Solo-Ar	38
3.4	METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DO SISTEMA	40
3.5	EQUACIONAMENTO	42
3.6	PARÂMETROS DE PROJETO	49
3.6.1	Vazão mássica do ar	49
3.6.2	Temperatura do ar de entrada	51
3.6.3	Temperatura do ar de saída	52
3.6.4	Temperatura do solo	53
3.6.5	Diâmetro do tubo	59
3.6.6	Comprimento do tubo	60
3.6.7	Distanciamento entre tubos	63

3.6.8	Outras considerações	64
4	PROJETO DEMONSTRATIVO	68
4.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	68
4.2	PROJETO ARQUITETÔNICO.....	69
4.3	CARACTERÍSTICAS DO SOLO E DO CLIMA.....	71
4.4	DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR	76
4.5	OUTRAS CONSIDERAÇÕES	83
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	APÊNDICE A – Projeto arquitetônico da residência unifamiliar.....	96
	APÊNDICE B – Topografia do terreno, residência e pontos de sondagem.....	103
	APÊNDICE C – Projeto executivo do Trocador de Calor Solo-ar.....	104
	ANEXO A – Relatório de sondagem: locação dos furos	107
	ANEXO B – Relatório de sondagem: boletins de sondagem	108

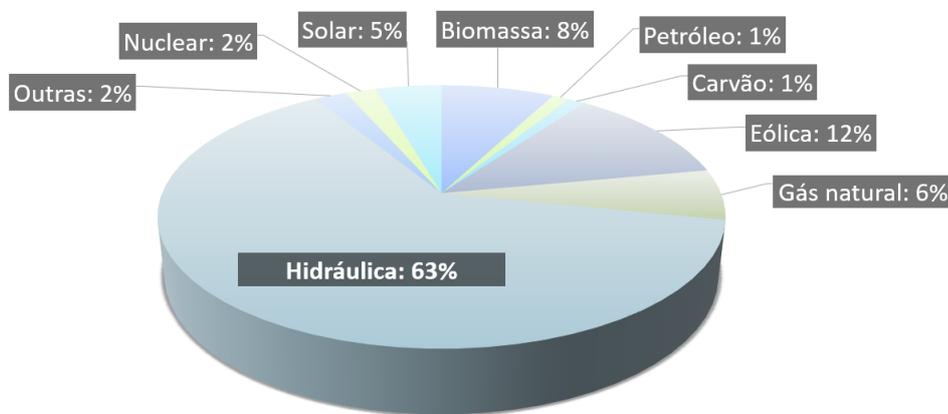
1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento crescente da demanda de novas edificações aquece a indústria da construção civil, fomentando a economia e a geração de emprego e renda. Entretanto, as edificações são uma das maiores causadoras da degradação ambiental, decorrente não apenas das etapas de sua construção, mas também ao longo de toda sua vida útil. Além dos recursos consumidos e dos resíduos gerados, após o término da construção, as edificações demandam uma porcentagem significativa de energia elétrica e de outros recursos, além de produzirem grandes quantidades de lixo doméstico e de esgoto sanitário.

Neste contexto, nasce a necessidade de mitigar os problemas ambientais gerados, fazendo-se fundamental o papel da sustentabilidade nas edificações. A construção sustentável tem (ou, ao menos, deveria ter) a função de reduzir o quadro de degradação ambiental e poluição, não apenas nas fases construtivas dos empreendimentos, mas também ao longo de toda a vida útil dos edifícios.

Uma das ideias centrais da sustentabilidade na construção civil está relacionada à eficiência energética das edificações. Considerando-se o fato de grande parte da energia elétrica ainda ser obtida por meio de fontes não renováveis, como derivados do petróleo, gás natural e carvão, e de haver restrições e problemas ambientais relacionados à expansão das usinas hidrelétricas, o consumo de energia em si é prejudicial. A Figura 1 apresenta a matriz elétrica do Brasil para o ano de 2023 (ano base 2022).

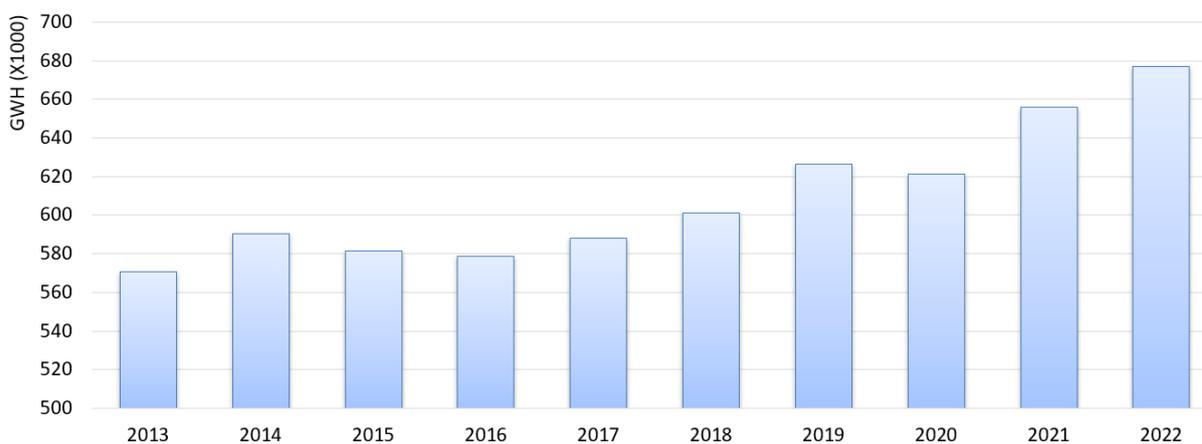
Figura 1 – Matriz elétrica brasileira no ano de 2023



(fonte: adaptado de BRASIL, 2023)

Além de problemático, o consumo de energia elétrica tem sofrido uma demanda crescente nos últimos anos. Segundo Brasil (2023), o consumo elétrico cresceu cerca de 18,6% entre os anos 2013 e 2022. A Figura 2 mostra a evolução do consumo/geração de energia elétrica no país ao longo da última década.

Figura 2 – Geração de energia elétrica no Brasil ao longo da última década



(fonte: adaptado de BRASIL, 2023)

Assim, tem-se a atual situação do crescente consumo de energia no país e um possível cenário futuro de aumento da degradação ambiental pelos impactos ambientais decorrentes da implantação de novas usinas hidrelétricas ou por outras formas de ampliação da geração de energia. Neste interim, busca-se mitigar o problema da crescente demanda elétrica melhorando o desempenho energético das edificações.

Dessa forma, deve-se ressaltar o importante papel que os engenheiros e arquitetos têm, de buscar novas maneiras para melhorar o desempenho térmico das edificações (o que também as torna energeticamente mais eficientes), incorporando-as aos novos projetos em que vierem a trabalhar, de forma a colaborar com a reversão da problemática decorrente do crescimento do consumo de energia elétrica no país.

Existem diversas soluções, de diferentes naturezas, para os frequentes problemas de ineficiência térmica vivenciados no dia-a-dia das construções. Alguns exemplos são: aumentar a espessura das paredes e da cobertura, utilizar materiais que tenham uma maior capacidade térmica nas paredes e na cobertura, utilizar coberturas verdes ou solo/brita em lajes de cobertura, dentre outras soluções. Outra possível solução é utilizar a inércia térmica de elementos externos à edificação (como o solo), podendo-se destacar duas formas distintas de fazê-lo. Uma delas é substituir completamente os aparelhos de ar condicionado por sistemas de condicionamento mais sustentáveis, que possibilitem o conforto higrotérmico, como é o caso dos trocadores que exploram a inércia térmica do solo e dos trocadores de calor que exploram a inércia térmica de corpos d'água. Embora seja muito atraente, essa alternativa nem sempre é possível, pois estes sistemas têm muitas limitações em relação aos condicionadores de ar convencionais, como não funcionarem satisfatoriamente nos casos mais extremos de temperatura e umidade relativa do ar e de não proporcionarem variações de temperatura elevadas na regulação da temperatura do ar. Outra solução é utilizar estes sistemas em paralelo ao uso dos aparelhos de ar condicionado, como alternativa de melhoria da eficiência energética, por meio da redução do consumo elétrico dos aparelhos de ar condicionado (embora não seja a condição ideal, é uma alternativa para as situações mais extremas, em que o clima da região não possibilite a substituição total dos sistemas de condicionamento convencionais).

Dentre as possibilidades de uso da inércia térmica, implementar sistemas que o façam com o uso do solo é muito interessante, devido ao fato desse ter uma capacidade térmica elevada, decorrente da massa da terra, a qual pode ser considerada praticamente infinita quando comparada à massa de uma edificação. Dessarte, mesmo não sendo tão eficientes na regulação térmica do ar como os aparelhos de ar condicionado convencionais, os sistemas de trocador de

calor que exploram a inércia térmica do solo têm uma fonte inesgotável e gratuita de regulação de temperatura, o que é possibilitado pela inércia térmica do solo. Este fato propicia o funcionamento ininterrupto de sistemas desse tipo, sem implicar grandes gastos de eletricidade, possibilitando serem utilizados, paralelamente à função de regulador térmico, como exaustor, melhorando a higiene e qualidade do ar do ambiente edificado.

O uso da inércia térmica do solo para o conforto higrotérmico não é uma prática exclusivamente da sociedade humana atual. Segundo Musskopf (2006), os primeiros a fazerem uso do solo como armazenador térmico foram os Vikings, na Escandinávia, os quais construía suas casas total ou parcialmente enterradas, revestindo-as com madeira e turfa, de forma a manter os ambientes mais aquecidos. As tribos Kaingang – povos indígenas do Brasil meridional, que ocupavam áreas que iam desde o oeste paulista até o norte do Rio Grande do Sul – também faziam uso do solo como regulador térmico de suas moradias, escavando a profundidades que variavam entre 2,5 a 5 metros, havendo casos registrados de até 6 metros (D'ANGELIS; VEIGA, 2014). Outro exemplo dessa prática são os porões das residências dos imigrantes italianos que se estabeleceram no Brasil no século XIX, construídos em contato direto com a terra, cuja função era garantir que a temperatura fosse mantida baixa e constante, possibilitando a conservação dos alimentos produzidos (como uma espécie de geladeira natural), o que era fundamental para garantir a subsistência da família na época (ZANCHETI; AZEVEDO; MOURA, 2015).

Note-se, portanto, que o uso da inércia térmica do solo como regulador de temperatura surgiu como uma forma instintiva de nossos ancestrais se protegerem da hostilidade do clima em diversas regiões do mundo. Os métodos utilizados por eles eram bastante simples, fazendo-se o contato direto do solo com os ambientes construídos. Na atualidade existem soluções mais sofisticadas, utilizando-se sistemas que permitem as trocas térmicas com o solo sem o contato direto com a edificação, fazendo com que o solo funcione, segundo Vaz (2011), como um reservatório de energia na troca de calor com o ar ambiente. É possível fazer também a quantificação das trocas de calor e o dimensionamento destes sistemas – ou seja, atualmente podem ser utilizadas soluções de engenharia.

Uma solução de engenharia comumente usada atualmente, consiste em trocadores de calor geotérmico, constituídos basicamente em tubulações enterradas, no interior das quais se faz circular ar ou um fluido (normalmente água), ocorrendo, assim, as trocas de calor entre o ar do ambiente edificado e o solo. No caso do ar circulando dentro dos tubos de um sistema aberto, ocorre uma troca direta de calor (a energia térmica é transferida diretamente do solo para o ar); no caso de um fluido circulando no interior dos tubos, ocorre uma troca indireta de calor (a energia térmica é transferida primeiramente do solo para o fluido e então do fluido para o ar).

Quanto à natureza do calor fornecido ao sistema, existem dois tipos diferentes de trocadores de calor geotérmico: os de baixas temperaturas – é o caso dos trocadores de calor que fazem uso da inércia térmica do solo – e os de elevadas temperaturas – é o caso daqueles que se utilizam do calor proveniente do núcleo terrestre, sendo normalmente instalados em regiões de afloramento do magma. Sistemas deste segundo tipo não são o foco deste trabalho, pois têm maiores restrições relacionadas à sua implementação, podendo ser instalados somente em regiões nas quais ocorre o afloramento, normalmente fazendo a captação do calor da água aquecida pelo magma (ou do vapor d'água, quando as temperaturas são mais elevadas). Além de raras, regiões de afloramento do magma podem implicar futuras (e indesejadas) erupções vulcânicas, as quais podem destruir não apenas o sistema instalado, mas também a edificação inteira.

Por fim, devido ao fato de ter uma fonte mais abundante na superfície terrestre, por ser mais seguro, por sua demanda devido ao clima do nosso país e pelas outras razões apontadas anteriormente (abordadas com maior profundidade nos capítulos seguintes), o foco deste trabalho é a geotermia de baixas temperaturas, mais especificamente, trocadores de calor que se utilizam da inércia térmica do solo.

2 OBJETIVOS

Este capítulo destina-se a definir os objetivos deste Trabalho de Conclusão de Curso, além de apresentar outras formalidades relacionadas a ele.

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal consiste em demonstrar a viabilidade técnica do aproveitamento da inércia térmica do solo por meio de um Trocador de Calor do tipo Solo-Ar para o conforto higrotérmico em edificações residenciais unifamiliares.

2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

São objetivos secundários:

- a) Fazer um levantamento de metodologias de cálculo e de dimensionamento de trocadores de calor geotérmico do tipo solo-ar existentes;
- b) Fazer a sistematização de parâmetros relacionados ao dimensionamento de um trocador de calor geotérmico;
- c) Apresentar um projeto demonstrativo de um trocador de calor do tipo solo-ar, que se utilize da inércia térmica do solo, para uso em uma residência unifamiliar.

2.3 PREMISSAS E PRESSUPOSTOS

Foram consideradas as seguintes premissas e pressupostos:

- a) A problemática do aumento da demanda por energia elétrica;
- b) A problemática da queima de derivados do petróleo, carvão mineral, dentre outros, para a geração de energia elétrica, por liberar grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera;
- c) A problemática da construção de usinas hidrelétricas, causadoras de degradação ambiental, não só pela emissão de gás carbônico das reações químicas da elevada

quantidade do concreto utilizado, mas também pela destruição de ecossistemas e habitats das áreas alagadas para represamento de água, além de poderem causar problemas socioeconômicos;

- d) A relevância da sustentabilidade na construção civil;
- e) Devido ao fato de o solo ser um reservatório de inércia térmica, pode-se considerá-lo como uma fonte inesgotável.

2.4 LIMITAÇÕES E DELIMITAÇÕES

Como principal limitação deste trabalho, tem-se que o estudo de caso (projeto demonstrativo) é ficcional, pois há dificuldade de se encontrar uma obra com as características necessárias para a realização deste trabalho. Devido também a limitações financeiras, não são apresentados/construídos protótipos do Trocador de Calor.

Consistem delimitações do trabalho:

- a) Não é apresentado um estudo de viabilidade econômica, apenas de viabilidade técnico do sistema avaliado;
- b) Para o dimensionamento do trocador de calor, foi avaliado apenas o mês mais quente e não os doze meses do ano;
- c) O dimensionamento do trocador de calor é feito com base nos cálculos apenas para a refrigeração do ambiente, e não para o aquecimento;
- d) Poderiam ter sido abordados sistemas com diferentes vazões, turnos de operação (acionamento em menos horas do dia) e outras características diferentes, mas por uma questão de extensão do trabalho, não foram considerados.

2.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo destina-se à **Contextualização**, a qual consiste em uma breve apresentação do tema abordado no presente trabalho, bem como de sua relação com a Engenharia Civil e de sua importância à atual condição em que a sociedade humana se encontra.

No segundo capítulo constam os **Objetivos** do trabalho, dentre os quais, o objetivo principal, os objetivos secundários, as premissas e pressupostos, as delimitações (demarcação/traçado dos temas, assuntos e/ou outras condições específicas), as limitações (restrições da metodologia e/ou de outras condições específicas) e a estrutura do texto.

O terceiro capítulo é a **Revisão Bibliográfica** que é o embasamento teórico do trabalho, o qual engloba temas como a eficiência energética e inércia térmica das edificações, o clima, a inércia térmica superficial do solo, a metodologia utilizada e as existentes, o equacionamento de dimensionamento do Trocador de Calor e os Parâmetros de Projeto.

O quarto capítulo consiste em um **Projeto Demonstrativo** de um Trocador de Calor para uma residência unifamiliar, no qual são aplicados os conhecimentos apresentados no decorrer do texto. Nele é feita uma subdivisão em quatro principais partes: projeto arquitetônico, características do solo e do clima, dimensionamento do trocador de calor e outras considerações.

O quinto capítulo são as **Considerações Finais**, que é o fechamento do texto, apresentando as conclusões e a discussão dos dados obtidos no projeto demonstrativo, bem como outras considerações feitas em relação à metodologia, aos objetivos atingidos e a sugestões de trabalhos futuros.

Ao final do trabalho também constam os **Apêndices** e **Anexos**, nos quais estão contidas informações relevantes ao projeto demonstrativo apresentado no quarto capítulo. Dentre as informações neles contida incluem-se: projeto arquitetônico da residência unifamiliar; topografia do terreno; projeto executivo do Trocador de Calor Solo-ar; relatório de sondagem (locação dos furos e boletins de sondagem).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INÉRCIA TÉRMICA

A eficiência energética é imprescindível para o desenvolvimento sustentável, levando arquitetos e engenheiros e repensar as técnicas construtivas, de forma a avaliar a utilização de métodos que tenham um menor consumo energético, mas que atendam às necessidades dos usuários, como conforto térmico, acústico, lumínico e psicológico (INATOMI, 2008).

A eficiência energética nas edificações

[...] pode ser entendida como um atributo inerente à edificação representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia. Portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014, p. 5).

Os autores também afirmam que cada decisão tomada durante o desenvolvimento de um projeto influencia no desempenho térmico da edificação. Dessa forma, um bom projeto deve incluir análises do desempenho energético.

Inatomi (2008) afirma que a questão da eficiência energética é um fenômeno físico complexo, mas que existe uma busca incessante do desenvolvimento e implantação de algoritmos e novos equacionamentos para sua melhor interpretação e exploração. Segundo a autora, são muitas as variáveis que devem ser consideradas, como: materiais de construção, ocupação, utilização do edifício, equipamentos, sistemas de iluminação, sistemas de energia renovável, sistemas de condicionamento de ar, sistemas de controle, clima local, projeto arquitetônico, dentre outros.

É durante a fase de projeto que esse quadro de pouca eficiência energética de uma edificação pode ser revertido. Após construído o edifício, dificilmente poderão ser revertidas as condições de desconforto térmico dos ambientes construídos sem que ocorram grandes consumos energéticos, como é o caso da climatização por meio de aparelhos de ar condicionado.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014, p.8), “[...] a arquitetura vernacular, que é genuína, correta, pura e isenta de estrangeirismos, ensina muitas técnicas, conceitos e princípios bioclimáticos e sustentáveis que podem ser empregados em edificações que persigam a alta eficiência energética”. Segundo os autores, esse conceito consistia em aproveitar-se das características desejáveis do clima, enquanto se evitavam as indesejáveis.

A arquitetura vernacular baseia-se muito na observação e no empirismo, empregando, muitas das vezes, comportamentos instintivos de proteção contra a hostilidade do ambiente em que se está vivendo. Na atualidade, o avanço da tecnologia proporciona à humanidade a possibilidade do uso de técnicas e de engenharia em que se permite atingir os mesmos objetivos que diversos povos da antiguidade ao longo da história atingiram, empregando sistemas tecnologicamente mais complexos, contudo, utilizando-se dos mesmos conceitos que os nossos ancestrais instintivamente utilizaram. Ter consciência desse fato é importante, pois permite-nos olhar por uma perspectiva diferente para o emprego da tecnologia na construção civil.

A climatização dos ambientes edificados é um tema importante em se tratando da eficiência energética. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apresentam dados sobre o consumo energético no Brasil e no mundo, afirmando que em edifícios residenciais do Brasil, o condicionamento de ar é o terceiro maior gasto de eletricidade, responsável por 20% do consumo energético das residências – sendo inferior somente à refrigeração para conservação de alimentos (27%) e ao aquecimento de água (24%); nos edifícios comerciais, o ar condicionado é o maior responsável pelo consumo de energia elétrica, correspondendo a 47% do total dos gastos. Esse apontamento reforça a importância de buscar elaborar projetos de edifícios que os tornem energeticamente mais eficientes, possibilitando-os proporcionar o conforto térmico aos usuários sem a necessidade de tanto consumo elétrico, como frequentemente tem acontecido na atualidade.

A justificativa para a climatização de ambientes nasce da busca por conforto, que é uma característica intrínseca do ser humano. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) definem conforto ambiental como sendo um conjunto de condições que proporcionam, entre outros, o bem-estar térmico. O conforto térmico é o estado de espírito de satisfação com o ambiente térmico que

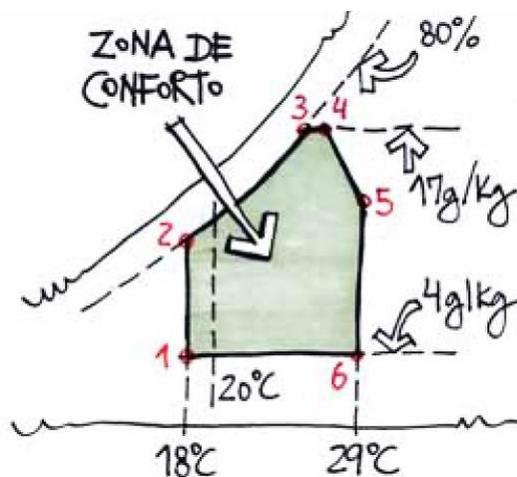
circunda o indivíduo, sendo atingido quando o balanço das trocas térmicas de calor incidente sobre o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites.

Dessa forma, para que se possa quantificar a eficiência energética das edificações dentro do conceito de eficiência térmica, é necessário primeiramente quantificar o conforto térmico. As variáveis ambientais que influenciam termicamente e podem ser medidas são a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar, a temperatura radiante do ambiente, a atividade física e a vestimenta utilizada pelos ocupantes do ambiente.

Um dos métodos de medição do conforto térmico é o *Predicted Mean Vote* – PMV, que é uma forma de quantificar a sensibilidade humana ao calor e ao frio, no qual o valor zero corresponde ao conforto térmico, assumindo valores negativos para frio e valores positivos para quente – nessa classificação, um ambiente confortável está enquadrado no intervalo $-0,5 < PMV < +0,5$. Outro método existente é o conceito de temperatura neutra, que pode ser calculada pela equação $T_n = 2,6 + (0,831 \times T_m)$, onde T_n é a temperatura neutra e T_m é a temperatura média do ar. Ainda outra forma de avaliar o conforto térmico, é por meio do uso de um confortímetro, que é um aparelho que reúne diversos sensores que, conectados a um computador, podem calcular índices de conforto, como o PMV, entre outras funções (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Lamberts, Dutra e Pereira (2014, p. 83) afirmam que “[...] o organismo humano pode estar em conforto mesmo em diversos limites de umidade relativa (entre 20% e 80%) e de temperatura (entre 18°C e 29°C)”. Os autores apontam uma série de ações a serem adotadas dentro deste intervalo de temperatura e umidade, como: evitar impacto do vento para temperaturas próximas aos 18°C; aos 20°C deve-se garantir que o ambiente seja sombreado; nas temperaturas superiores a 20°C deve-se controlar a incidência de radiação solar. A Figura 3 apresenta a zona de conforto térmico humano, onde a curva de 80% corresponde à umidade relativa do ar limite e as linhas verticais de 18°C e 29°C correspondem aos extremos de temperatura, para que o conforto térmico humano seja possível.

Figura 3 – Zona de conforto térmico

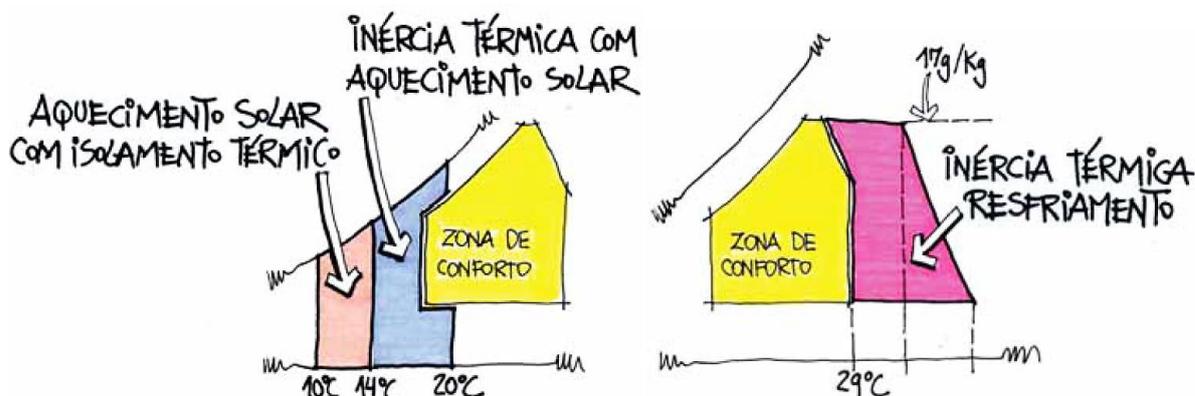


(fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Um conceito importante que tem relação tanto com o conforto térmico como com a eficiência energética é a inércia térmica, que é, basicamente, a capacidade de um elemento (neste caso, a edificação) de armazenar e liberar calor (PAPST, 1999). Em termos técnicos pode-se dizer que “[...] o conceito de inércia térmica está relacionado com a capacidade térmica da estrutura por unidade de superfície, que é o produto da densidade pela espessura e pelo calor específico do material.” (PAPST, 1999, p. 1).

Quando bem explorada em uma edificação, a inércia térmica pode diminuir as variações de temperatura internas em relação às externas, evitando os picos de temperatura que causam o desconforto. Entretanto, o uso da inércia térmica é limitado, não sendo possível empregá-la em condições climáticas extremas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Papst (1999) também ressalta o efeito de amortecimento dos picos de temperatura externa, que implica o atraso dos picos máximo e mínimo da temperatura interna, proporcionado pela inércia térmica. A Figura 4 apresenta as restrições de uso da inércia térmica em edificações, para o caso do aquecimento do ambiente (à esquerda) e para o caso do resfriamento (à direita).

Figura 4 – Zona de inércia térmica em edificações



(fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Além de ser uma estratégia importante para o inverno, a inércia térmica também tem efeito positivo no verão, ao ser usada em fechamentos laterais da edificação. Entretanto, na situação de uma cobertura possuir inércia térmica, é mais interessante evitar o ganho térmico decorrente da radiação solar, utilizando-se barreiras radiantes ou por meio de isolamento térmico (PAPST, 1999). Assim, elementos construtivos com grande inércia térmica podem ser favoráveis à edificação em relação ao conforto térmico. Em contrapartida, uma envoltória com baixa inércia térmica acarreta uma maior influência das condições climáticas externas sobre a temperatura do ambiente interno (SOUZA; AMPARO; GOMES, 2011).

Santamouris et al. (1996) afirmam que, durante o inverno, quando é necessário o aquecimento, o ganho solar nas horas do dia é armazenado na massa térmica e transferido no período noturno para o interior da edificação; em contrapartida, durante o verão, a massa térmica armazena o calor, reduzindo o pico atingido, utilizado para dimensionamento da carga de resfriamento.

Por fim, mas não menos importante, cabe ressaltar que todas essas colocações referentes ao uso da inércia térmica dizem respeito aos materiais constituintes da construção, como as paredes e outros elementos construtivos. Entretanto, pode-se utilizar de outras reservas de calor, como é

o caso do solo, o qual, pelo fato de ter uma quantidade abundante de massa, apresenta-se como um grande reservatório térmico¹.

Souza, Amparo e Gomes (2011) ressaltam a relevância da inércia térmica do solo e sua aplicação para o conforto em edificações, apresentando um estudo de caso em que se utiliza dela como estratégia de resfriamento. Os autores afirmam que a influência da inércia térmica do solo somente será positiva se estiver associada a estratégias de ventilação natural e sombreamento. Na verdade, existem diversas estratégias que podem ser adotadas que potencializam a eficácia do uso da inércia térmica do solo. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) também apresentam a possibilidade do uso da inércia térmica do solo corroborando com a ideia de que sua exploração para o uso em edificações é uma boa alternativa para que seja atingido o conforto higrotérmico.

3.2 CLIMA

O clima local é um parâmetro muito importante a ser considerado em um projeto de trocador de calor geotérmico, especialmente nas fases iniciais de planejamento e tomada de decisão por utilizar-se ou não tais sistemas.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o clima apresenta as seguintes variáveis: radiação solar, luz natural, vento e umidade. Segundo os autores, no Brasil, o clima é bastante diversificado; na região sul (que é a região de maior interesse para este trabalho), predomina o clima subtropical, que tem as seguintes características: as temperaturas médias normalmente são inferiores a 20°C, com uma amplitude anual variando entre 9°C e 13°C; ocorre abundância e boa distribuição territorial das chuvas, estando na faixa de 1.500 a 2.000 mm/ano; e, nas áreas mais elevadas, tem-se um inverno mais rigoroso, havendo a possibilidade de neve.

¹ Note-se, sobre esse tópico, que a inércia térmica do solo é o foco deste trabalho, e este assunto é abordado com mais profundidade somente nos próximos capítulos.

Angnes (2018) destaca a necessidade de se ter dados quantitativos do clima, como a amplitude da temperatura diária e anual, dentre outros. Para que sejam efetivos, os trocadores de calor que aproveitam a energia acumulada no solo dependem de uma amplitude térmica adequada ou, pelo menos, suficiente. A Tabela 1 apresenta dados de cidades brasileiras:

Tabela 1 – Características do clima de seis cidades brasileiras

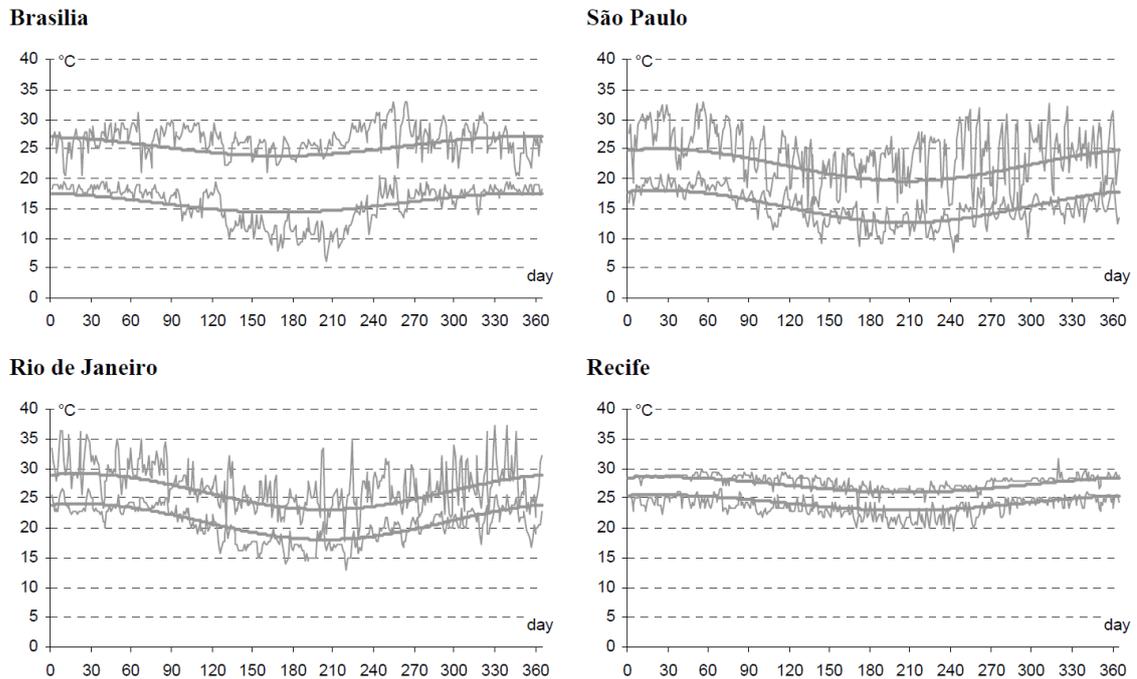
Cidade	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Temperatura média (°C)	Amplitude no ano (K)	Amplitude no dia (K)
Brasília	15°52'	47°56'	1171	20,7	3,2	9,5
São Paulo	23°37'	46°39'	760	18,8	5,4	7,0
Rio de Janeiro	22°50'	43°15'	2	23,6	6,0	5,0
Recife	8°08'	34°55'	4	25,7	2,6	3,0
Florianópolis	27°40'	48°33'	3	20,7	7,7	5,7
Porto Alegre	30°00'	51°11'	3	19,2	10,6	8,0

(fonte: adaptado de HOLLMULLER *et al.*, 2006)

Pode-se observar na Tabela 1 que, nesta amostra, Brasília e Recife são as cidades que apresentam as menores amplitudes anuais. Em contrapartida, Florianópolis e Porto Alegre são as cidades com os maiores extremos de temperatura.

Os gráficos apresentados na Figura 5 permitem a visualização mais clara do comportamento do clima em quatro das cidades anteriormente analisadas.

Figura 5 – Extremos das temperaturas mínimas e máximas para quatro cidades brasileiras: Brasília, São Paulo, Rio de Janeiro e Recife

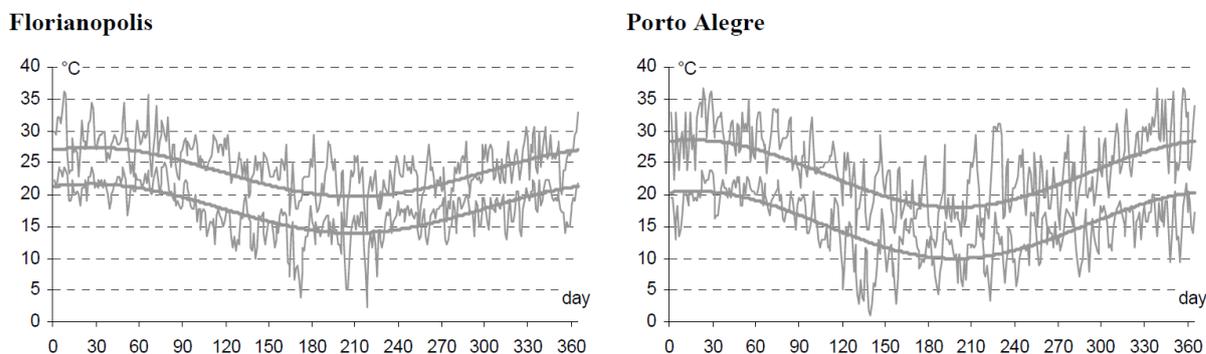


(fonte: HOLLMULLER *et al.*, 2006)

Note-se que Brasília e Recife, dentre as cidades apresentadas, têm as menores amplitudes térmicas anuais, sendo as menos adequadas para a implantação de trocadores de calor de inércia térmica, pois nelas, quase não será sentido o efeito de condicionamento proporcionado pelo trocador de calor. São Paulo e Rio de Janeiro, embora apresentem variações diárias intermediárias, não apresentam grandes variações anuais. Não foi encontrado na literatura um parâmetro que classifique a adequação de valores para amplitudes térmicas em relação aos trocadores de calor, entretanto sabe-se que a eficiência destes sistemas depende, de variações das temperaturas tanto diárias quanto anuais. Não é o valor da temperatura do ambiente em relação ao conforto térmico humano, que torna uma cidade adequada ou não ao uso de trocadores de calor, mas sim a variação (ou amplitude) das temperaturas, como é o caso do Rio de Janeiro, em que, considerando-se as temperaturas médias anuais, tem-se valores elevados o ano todo, o que faz com que esta região não seja ideal à implantação destes sistemas.

Os gráficos a seguir (Figura 6) apresentam os dados de outras duas cidades brasileiras, com suas variações de temperatura.

Figura 6 – Extremos das temperaturas diárias para Florianópolis e Porto Alegre



(fonte: HOLLMULLER *et al.*, 2006)

Observe-se que Florianópolis e Porto Alegre são as cidades que têm a maior amplitude térmica anual e, no caso de Porto Alegre, uma das maiores amplitudes diárias, sendo locais adequados para a instalação de sistemas de trocador de calor que se utilizam da inércia térmica do solo. Note-se também que ambas as cidades se situam próximas do Trópico de Capricórnio, em uma zona subtropical.

Cidades localizadas ao longo dos Trópicos são mais indicadas à implantação de trocadores de calor geotérmico, pois normalmente possuem maiores amplitude térmicas anuais (ANGNES, 2018).

3.3 INÉRCIA TÉRMICA SUPERFICIAL DO SOLO

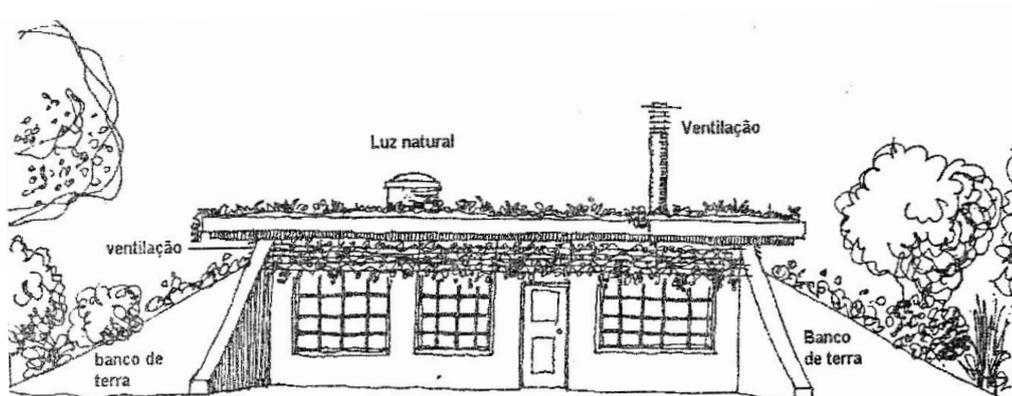
O solo tem uma inércia térmica elevada, fazendo com que haja um retardo térmico que pode ser observado nas amplitudes diárias. Nas noites, à medida que o ar esfria, o solo conserva calor por mais tempo, liberando-o lentamente, enquanto que durante o dia o absorve com menor velocidade (HOLLMULLER, 2003). Assim, é possível utilizar a massa terrestre como uma estratégia de resfriamento ou aquecimento natural de edificações.

O subsolo tem uma menor variação de temperatura em relação ao ambiente. Em períodos de menor temperatura, abaixo da superfície é menos frio; em períodos de maior temperatura, o subsolo é menos quente, podendo-se inferir que ocorre uma amenização e estabilização do

comportamento térmico do solo em relação à variação climática dos ambientes externos. Este fenômeno é uma alternativa possível para o pré-aquecimento de ambientes no inverno e para o resfriamento de ambientes no verão, existindo duas estratégias diferentes, que são a edificação em contato direto com o solo e o contato indireto da edificação com o solo.

O contato direto com o solo das edificações normalmente apresenta custo de manutenção e operação baixos devido a características intrínsecas como limitadas perdas de calor e infiltração, proteção ao calor externo e à radiação solar direta, ótima proteção contra ventos e tempestades, redução de ruídos e vibrações, além de uma excelente condição de segurança. Mas seus aspectos negativos são a baixa resposta às trocas climáticas, a condensação interna, pouca iluminação natural do ambiente e a baixa qualidade do ar (MIHALAKAKOU; SANTAMOURIS; ASIMAKOPOULOS, 1992). Além disso, existe a necessidade de proteção mais efetiva quanto à percolação de água da chuva e de umidade em geral. A Figura 7 ilustra esse tipo de utilização da inércia térmica do solo por contato direto.

Figura 7 – Casa protegida por bancos de terra para climas áridos



(fonte: MOLLISON, 1998)

Um exemplo dessa prática na antiguidade provém das tribos Kaingang. Existem indícios históricos de que estes povos indígenas do Brasil meridional – que ocupavam áreas que iam desde o oeste paulista até o norte do Rio Grande do Sul – faziam uso do solo como regulador térmico de suas moradias. Em um estudo sobre as habitações Kaingang do passado, D’Angelis e Veiga (2014, p. 219) constataram que “[...] trata-se de verdadeiras casas circulares, escavadas

na terra [...] com profundidade média de 2,5 a 5 metros de altura, havendo casos registrados de 4 e até 6 metros de profundidade.”.

Zancheti, Azevedo e Moura (2015) exemplificam o caso do contato direto, mostrando que nos subsolos residenciais – como é o caso dos porões das moradias rurais de colonizadores italianos que se estabeleceram no Brasil no século XIX – ocorria o uso da inércia térmica do solo para refrescar o ambiente e assim garantir a conservação dos alimentos. Segundo os autores:

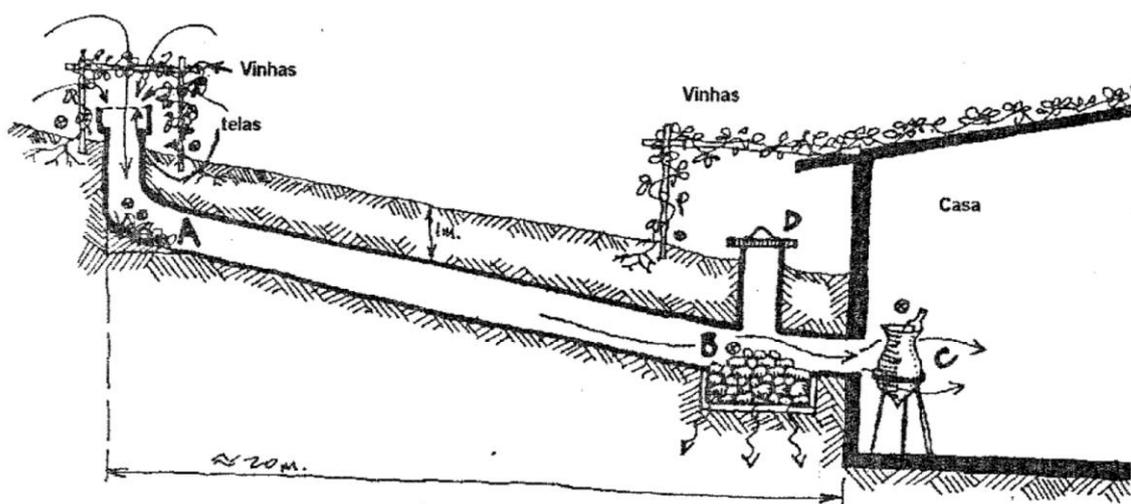
Como parte importante da casa rural, o porão é elemento constante em todas as residências. Normalmente é construído em pedra e apresenta poucas aberturas e acessos, os quais são independentes do restante da casa. Os materiais e o controle das aberturas permitem que a temperatura seja mantida baixa e praticamente constante, importante para a conservação de alimentos produzidos [...]. Deste modo, o porão assume um papel fundamental para a garantia da subsistência da família, como local de armazenagem de alimentos que requerem baixas temperaturas, como uma espécie de geladeira natural, obtida a partir do modo de inserção no terreno – frequentemente com partes em contato direto com a terra – e do uso de materiais e técnicas construtivas adequadas (ZANCHETI; AZEVEDO; MOURA, 2015, p. 100).

No caso do contato indireto, utiliza-se o solo como armazenador de calor, fazendo passar dutos enterrados, no interior dos quais se faz circular o fluido que receberá a regulação de temperatura. Nesses sistemas, ocorre a transferência de calor entre o ar ou água, o duto e o solo. Diversos autores ressaltam que a eficiência do sistema depende de diversos aspectos como: características e propriedades térmicas do solo, perfil de temperaturas no solo, ciclo diário de temperatura, ciclo anual de temperatura, velocidade de escoamento do ar nos dutos, profundidade dos dutos no solo, diâmetro e comprimento dos dutos, tipo de cobertura sobre o solo, interferência de transmissão de calor entre dutos próximos, variação de umidade dos dutos e do solo, dentre outros (VAZ, 2011).

Na Figura 8 é apresentado um exemplo de utilização da inércia térmica do solo por meio de contato indireto. Estes dutos enterrados, nos quais ocorrem as trocas de calor entre o ar e o solo, são, por definição, trocadores de calor geotérmico do tipo solo-ar, entretanto existem diversos outros tipos de trocadores de calor geotérmico. Na figura, as letras “A”, “B”, “C” e “D” são,

respectivamente, vegetação, pedras umedecidas, vaso cerâmico com água e chaminé/chapéu, elementos propostos pelo autor, neste caso específico, para melhorar o odor, e a umidade do ar.

Figura 8 – Dutos enterrados, no interior dos quais ocorrem as trocas de calor



(fonte: MOLLISON, 1998)

Segundo Musskopf (2006), a condutividade do solo tem uma relação direta com as trocas térmicas, podendo ocorrer o armazenamento de calor latente entre 10 a 12 horas.

Solos saturados tendem a conduzir calor de modo mais rápido do que solos não saturados, no entanto, um alto teor de argila ou matéria orgânica acaba diminuindo esta capacidade. Também a presença de quartzo, em determinadas quantidades, melhora a condutividade do solo (ANGNES, 2018).

Portanto, a inércia térmica do solo é caracterizada por absorver e reservar calor, ocorrendo uma defasagem em relação à sua liberação. Existem diversas estratégias diferentes de aproveitamento da inércia térmica do solo, podendo ser utilizados diferentes sistemas, nos quais ocorrem as trocas de calor, que possibilitam uma melhora nas temperaturas dos ambientes edificados. Muitos destes sistemas utilizam-se da energia geotérmica tanto de pequenas quanto de grandes profundidades.

A escolha, neste trabalho, pela inércia térmica do solo como estratégia para obter-se o conforto higrotérmico dá-se devido ao fato de o solo ser um reservatório praticamente infinito de inércia térmica (a massa da superfície terrestre é muito superior à massa de ar dos ambientes a serem condicionados, o que implica uma elevada capacidade térmica do sistema), ou seja, permite-se o condicionamento térmico do ar sem acarretar gastos energéticos (exceto algum eventual consumo de energia com a movimentação do ar ou fluido por meio de insufladores ou bombas, mas que pode ser considerado um consumo elétrico baixo, quando comparado ao consumo dos aparelhos de ar condicionado).

Além disso, diferentemente da geotermia de elevadas temperaturas, a inércia térmica do solo pode ser explorada em qualquer região da superfície terrestre, tornando-se um método que pode ser aplicado em edificações em que se tenham condições climáticas suficientes.

Outras vantagens são a possibilidade de funcionar ininterruptamente, promovendo a renovação do ar do ambiente interno da edificação, o que influencia na saúde dos ocupantes e, conseqüentemente, proporciona a melhoria da habitabilidade de forma geral. O fato de não ser exclusivista, ou seja, de poder ser usada em conjunto com aparelhos de ar condicionado, de forma a reduzir seu consumo elétrico e não para resolver totalmente a climatização do ambiente, acarreta em uma economia de energia, nos casos mais extremos, em que é indispensável o uso do ar condicionado.

Outro aspecto desejável é que a implantação destes sistemas se dá por meio de materiais não tão sofisticados e de forma bastante robusta (as tubulações são enterradas abaixo ou nas proximidades da residência), o que implica o fato de, principalmente quando utilizados em moradias sociais ou de populações de baixa renda, não serem alvo de saques ou de comercialização de componentes do sistema (o que é muito comum acontecer em sistemas mais tecnológicos e caros, como é o caso de placas fotovoltaicas).

Os próximos tópicos deste trabalho apresentam brevemente alguns destes sistemas de geotermia de pequenas profundidades, os quais se utilizam da inércia térmica do solo, e não do calor proveniente do núcleo terrestre.

3.3.1 Energia geotérmica

Energia Geotérmica é a energia armazenada na forma de calor de baixo da superfície da terra, a qual tem origem no fluxo geotérmico profundo, radiação solar absorvida, fluxo de águas subterrâneas e energia térmica armazenada no terreno. A energia geotérmica possui categorias de acordo com sua temperatura e com a profundidade, podendo ser divididas em: alta entalpia (temperaturas superiores a 180 °C); média entalpia (temperaturas entre 90°C e 180 °C); baixa entalpia (temperaturas entre 30 °C e 90 °C); e muito baixa entalpia (temperaturas abaixo de 30 °C) (OMIDO *et al.*, 2017).

Também pode-se dividir a geotermia em Geotermia Profunda e Geotermia Superficial (MADUREIRA, 2013).

A temperatura no interior do solo varia de acordo com a profundidade, sendo constante e igual à média anual da temperatura no ambiente externo, a uma determinada profundidade (VIEIRA, 2012).

Geotermia superficial é uma forma muito mais acessível de fazer uso da energia geotérmica, pois, com uma menor profundidade, é possível obter energia suficiente para a climatização de ambientes (TORRES, 2017). Além disso, a disponibilidade da geotermia superficial tem uma grande vantagem em relação à de grande profundidade, devido ao fato de poder ser explorada em qualquer região da superfície terrestre, sem a necessidade de execução de furos de grande profundidade. Na verdade, a geotermia superficial é essencialmente o uso da inércia térmica do solo.

O emprego da energia geotérmica pode ser feito através de bombas de calor, nas quais ocorre a troca de energia entre elementos com temperaturas diferentes (neste caso, o solo e o ambiente a ser condicionado) (SELF *et al.*, 2013). Pode-se também utilizar trocadores de calor mais simples, sem a necessidade da utilização de bombas de calor.

3.3.2 Bombas de calor geotérmico

Bombas de calor são máquinas que são capazes de captar e transferir calor de um corpo quente para um corpo frio e vice-versa, através de trabalho mecânico. Pode-se utilizar bombas de calor para transferir calor entre o solo e o ambiente edificado (TORRES, 2017).

Nestes sistemas ocorre a transferência de energia do subsolo para a edificação por meio de água, ou água com anticongelante, sendo este o fluido mais utilizado, a qual realiza as trocas entre os ambientes do edifício a ser climatizado e o solo (MEDEIROS; OMIDO, 2018). Faz-se circular o fluido no interior de tubos que são dispostos à profundidade necessária para que ocorra a troca de energia, podendo ser classificados quanto ao tipo de captação: sistema fechado ou sistema aberto (TEIXEIRA, 2011).

No sistema aberto, a troca de temperatura acontece entre um aquífero e a edificação, fazendo uso direto da água do próprio aquífero, transportando-a diretamente para a bomba de calor. Nesse caso, é necessário ter conhecimento dos parâmetros da água, como o PH e os limites de ferro e magnésio. Esse sistema pode ser de dois poços (Figura 9), ou de apenas um poço, sendo que no sistema com dois poços, um deles é usado para a captação e o outro para a devolução da água ao aquífero (não ocorre poluição da água, portanto não é necessário um sistema de tratamento) (MEDEIROS; OMIDO, 2018).

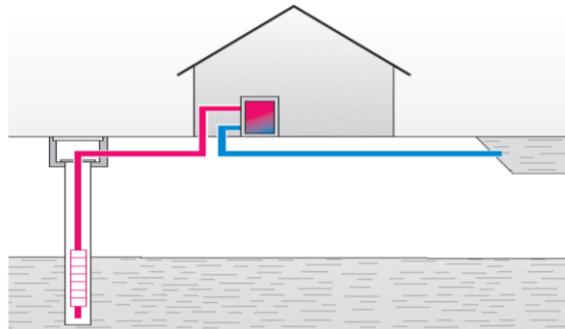
Figura 9 – Sistema aberto de captação utilizando dois poços



(fonte: MEDEIROS; OMIDO, 2018)

Teixeira (2011) mostra que, nos sistemas que contam com apenas um poço, a água é devolvida a um corpo d'água, ou seja, é escoada para galerias pluviais, rios, lagos, entre outros, não sendo devolvida ao aquífero diretamente. A Figura 10 representa esse sistema.

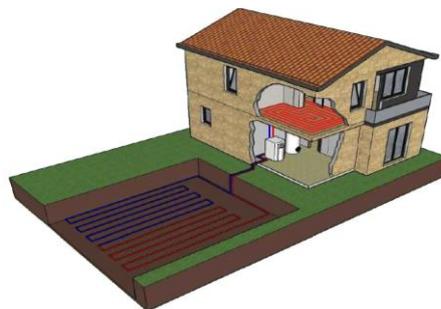
Figura 10 – Sistema aberto de captação, utilizando apenas um poço



(fonte: MEDEIROS; OMIDO, 2018)

No sistema fechado, o calor é o único recurso retirado do subsolo. Nesse sistema, ocorrem trocas de calor entre o solo, os tubos e o fluido, fazendo-se a coleta deste calor por meio da bomba de calor geotérmico, a qual é instalada no interior da edificação. O sistema pode ser de captação horizontal (Figura 11) ou captação vertical. De maneira geral, a captação horizontal é mais econômica devido ao fato de ocorrerem menos escavações, pois nela os tubos são instalados a aproximadamente um metro de profundidade. Entretanto, a desvantagem é que a dispersão dos tubos exige uma área maior. Deve-se também ter cuidado com o relevo (deve ser plano) e com a projeção de sombra sobre a superfície na qual serão instalados os dutos (MEDEIROS; OMIDO, 2018).

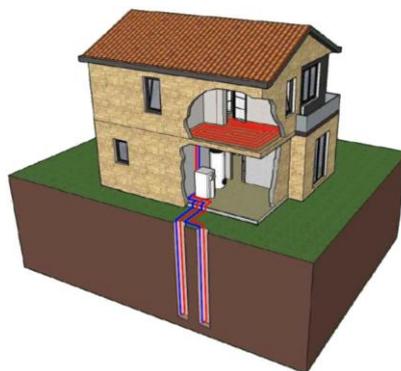
Figura 11 – Sistema fechado, com captação horizontal



(fonte: MEDEIROS; OMIDO, 2018)

No sistema de captação vertical (Figura 12) a área necessária é menor. Também, devido às grandes profundidades, a exposição ao sol não afeta a estabilidade do sistema. Outra vantagem é a grande estabilidade térmica, que aumenta conforme a profundidade (TEIXEIRA, 2011). Entretanto, esse tipo de captação costuma ser mais caro, devido aos custos das perfurações, podendo chegar a um terço do custo total do sistema (MOTA, 2016).

Figura 12 – Sistema fechado, com captação vertical



Fonte: (MEDEIROS; OMIDO, 2018)

O controle do sistema de climatização ocorre de maneira automática, fazendo a leitura e regulação da temperatura no interior da edificação. Assim, no modo de aquecimento, quando a temperatura na edificação for menor que a temperatura no subsolo, o controlador liga a bomba; no modo de refrigeração, quando a temperatura ambiente for maior que a temperatura no interior do solo, a bomba é acionada (TAVARES, 2011).

Comparando-se aos aparelhos de ar condicionado, as bombas de calor apresentam como vantagens uma maior eficiência energética, ocupam menor espaço, têm uma vida útil maior e fazem menos ruído (SANTOS, 2014). Segundo Tavares (2011), a eficiência energética pode ser observada na redução do consumo de energia elétrica, chegando a 60% nas residências.

3.3.3 Trocador de calor do tipo Solo-Ar

Segundo Angnes (2018) esse tipo de trocador de calor consiste em uma tubulação enterrada no solo em que se faz o ar externo circular, com a finalidade de climatizar a edificação de modo direto ou indireto. Nesse tipo de sistema a transferência de calor do solo para o ar no interior dos tubos é a ideia central para o condicionamento térmico da edificação. Os custos de implantação dessa tecnologia são menores, sendo mais econômico que as demais, e com uma menor manutenção. Uma de suas limitações, no entanto, é que normalmente tem uma menor eficiência que os demais modelos.

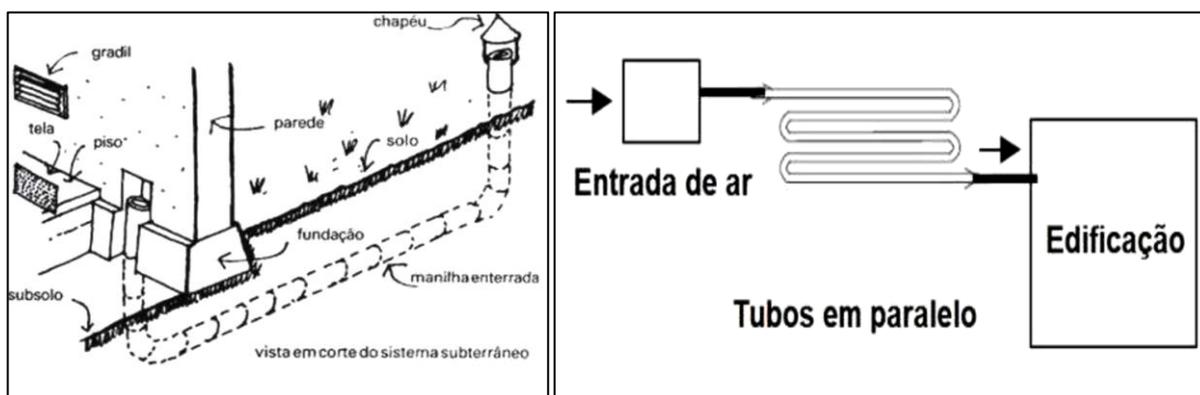
Duarte *et al.* (2011) afirmam que, apesar de suas limitações, existem situações que seu uso é vantajoso, como quando a edificação requer maior refrigeração do que aquecimento e em locais que ocorrem grandes amplitudes térmicas durante o ano.

Sistemas de trocador de calor solo-ar são bastante versáteis, podendo ser do tipo aberto ou fechado, com a disposição dos tubos nas configurações vertical, helicoidal e em formato horizontal (sendo a configuração horizontal a mais utilizada, por ser a mais econômica). Existe uma variação desse tipo de trocador, de circuito aberto, que é totalmente passiva, não necessitando de bomba de calor, que é chamada de Poço Canadense (quando o objetivo é aquecer o ambiente) ou Poço Provençal (quando o objetivo é resfriar o ambiente) (ANGNES, 2018).

O presente trabalho tem seu foco na disposição da tubulação na configuração horizontal, devido ao fato de a implantação do sistema deste tipo ser mais econômico que os demais.

Musskopf (2006) recomenda o uso de um elemento de proteção da entrada (“chapéu” ou “chaminé”) para evitar a infiltração de água da chuva, insetos e sujeira, permitindo ao mesmo tempo, a passagem do ar; e na saída da tubulação deve ser instalada uma tela para impedir a entrada de insetos. Deve ser observada também a manutenção no “chapéu” da entrada e na tela da saída da tubulação, de 3 a 4 vezes por ano para evitar que ocorram perdas de pressão pelo acúmulo de partículas suspensas no ar. A Figura 13 apresenta duas possibilidades da disposição da tubulação dos trocadores de calor do tipo solo-ar na configuração aberta.

Figura 13 – Variações de trocadores de calor do tipo solo-ar na configuração aberta



(fonte: adaptado de ANGNES, 2018)

Trocadores de calor que se utilizam da inércia térmica do solo, do tipo solo-ar, na configuração aberta, são o foco desse trabalho devido ao fato de serem os mais utilizados nas edificações em geral devido à maior disponibilidade, à possibilidade tanto de aquecimento quanto de resfriamento do ambiente, e por não depender de regiões de afloramento do magma, podendo ser explorada em qualquer região da superfície terrestre.

Outra justificativa da escolha desse tipo de trocador de calor para este trabalho consiste na característica destes sistemas de realizarem a renovação do ar do ambiente, diferentemente dos trocadores do tipo solo-fluido-ar. Essa característica oferece uma grande vantagem em relação a todos os outros tipos de trocadores, pelo fato de permitir que o ar do ambiente se mantenha higienizado e, ao mesmo tempo, mantendo a temperatura de conforto, sem a necessidade, por exemplo, da abertura das esquadrias, o que causaria um desconforto térmico em detrimento da renovação do ar, situação muito comum nas residências atuais.

Podem ser observadas ainda outras vantagens neste tipo de sistema que endossam a justificativa de sua escolha, como os aspectos discutidos na parte inicial do item 3.3 deste trabalho. Outro aspecto desejável é a robustez da instalação e a simplicidade dos materiais constituintes do sistema, o que dificulta os saques e a comercialização ilícita de componentes do sistema, principalmente nos casos de moradias sociais ou de populações de baixa renda, tornando-se um

sistema mais confiável neste sentido do que sistemas mais tecnológicos, como placas fotovoltaicas.

3.4 METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Kabashnikov *et al.* (2002) propõem uma metodologia que permite calcular a temperatura do solo e do ar em um trocador de calor solo-ar, para sistemas de ventilação. O modelo baseia-se na forma da integral de Fourier para a representação da temperatura. Utiliza-se de uma solução analítica exata para os componentes com tempos característicos da ordem de 24 horas; já a avaliação dos componentes com tempos da ordem de um ano faz-se por meio de uma simulação. O modelo também avalia a eficiência em função do espaçamento entre tubos e a influência na potência térmica de fatores como vazão de ar, comprimento, diâmetro e profundidade de enterramento dos tubos. O modelo também faz uma comparação dos resultados dos cálculos com dados experimentais.

Tzaferis *et al.* (1992) propõem uma metodologia na qual são avaliados oito algoritmos diferentes que preveem o desempenho de trocadores de calor terra-ar. Com ele, é feita a análise de fatores como sensibilidade dos métodos à temperatura do ar de entrada, velocidade do ar, comprimento do tubo, raio do tubo e profundidade do tubo. Dois tipos diferentes de experimentos foram projetados e realizados, e os resultados experimentais foram comparados com o conjunto de valores previstos, estimando também a precisão relativa de cada algoritmo para ambos os casos.

Levit, Gaspar e Piacentini (1989) propõem uma metodologia voltada a sistemas de condicionamento do ar para uso em estufa agrícola, por meio de tubos subterrâneos dispostos horizontalmente, que atuam como trocadores de calor do tipo ar-solo. O ar ambiente do interior da estufa é forçado através dos tubos e, após realizar as trocas de calor, retorna ao ambiente interno da estufa. O sistema explora a inércia térmica do solo, considerando como constante a temperatura do solo a uma determinada profundidade. O modelo combina simulação e equações, com o objetivo de encontrar as características ótimas do sistema do ponto de vista

técnico-econômico. Por fim, o artigo também apresenta uma comparação entre o custo de funcionamento em relação a um sistema convencional.

Hollmuller (2003) propõe uma metodologia voltada ao monitoramento *in loco* da temperatura do solo, fazendo uso de um modelo matemático, o qual, posteriormente, foi validado como uma solução analítica. Essa metodologia permite avaliar tipos diferentes de solo e condições de borda, além de possibilitar variações na geometria, permitindo também o estudo da difusão de calor, dos calores latente e sensível, do ensaio com infiltração de água e do controle do sentido do ar. É compatível com o software de simulação de energia TRNSYS.

Outra metodologia encontrada na literatura é a de Gauthier, Lacroix e Bernier (1997), que sugerem que se faça a substituição dos tubos de seção circular por tubos de seção quadrada, implicando o uso da equação $L = \sqrt{\pi}/(2 \cdot D)$. O modelo matemático apresenta um formato simétrico, no qual pode-se observar um perpendicularismo e paralelismo com a superfície, o que também ocorre com o gradiente de temperatura, resultando em uma redução do tempo de cálculo demandado.

Todos estes métodos citados anteriormente apresentam análises qualitativas e/ou quantitativas baseadas em características geométricas pré-estabelecidas de trocadores de calor, determinando, na maioria dos casos, parâmetros como a eficiência do sistema e as trocas que ocorrem. Nos casos em que são apresentados métodos de otimização dos sistemas, não são dadas equações explícitas dos parâmetros geométricos, sendo possível determiná-los somente por meio de modelagem numérica computacional. Dessa forma, continuou-se a busca na literatura, por um método mais simples de dimensionamento, em que fosse possível calcular os parâmetros geométricos diretamente, por meio de equações.

Por fim, Farias (2021) propõe um método que tem como objetivo dimensionar um trocador de calor solo-ar para o resfriamento de ambientes. Nele é apresentada uma revisão bibliográfica sobre variáveis importantes como características do solo, tipos de sistemas, transferência de calor e equacionamento para o dimensionamento, possuindo também um caráter experimental, avaliando diferentes diâmetros e temperaturas de saída do trocador de calor, para análise

quantitativa do seu comportamento. O equacionamento é bastante simples, possibilitando calcular os parâmetros geométricos (diâmetro, comprimento e número de tubos) a partir dos parâmetros de dimensionamento (vazão mássica do ar, temperatura de entrada do ar, temperatura de saída desejada após o trocador de calor e temperatura do solo).

Para o dimensionamento quantitativo do trocador de calor solo-ar deste trabalho, foi escolhida a metodologia de cálculo proposta por Farias, em seu trabalho publicado em 2021, devido ao fato de apresentar um método mais simplificado, cujo equacionamento é feito por meio de equações na forma explícita, para os parâmetros geométricos. Além disso, os dados de entrada do problema podem ser obtidos facilmente, descomplicando assim o processo de dimensionamento do trocador de calor, para as diversas situações de implantação dos sistemas.

3.5 EQUACIONAMENTO

A definição de parâmetros quantitativos e de um equacionamento tem um papel elementar no dimensionamento do trocador de calor, de forma a atender aos requisitos do sistema a ser implantado. A função a ser desempenhada pelo trocador, por exemplo, seja ela de aquecimento ou de resfriamento do ambiente da edificação, ocorre em decorrência de fatores como a temperatura do solo na vizinhança do tubo e da temperatura do ar externo (FARIAS, 2021).

Dessa forma, Farias (2021) define os seguintes parâmetros de dimensionamento do problema:

- \dot{m}_{ar} : vazão mássica do ar (kg/s);
- $T_{ar,e}$: temperatura do ar de entrada (°C);
- $T_{ar,s}$: temperatura do ar de saída desejada após o trocador de calor (°C);
- T_{solo} : temperatura do solo (°C).

Segundo Farias (2021), são o clima externo, a umidade, a composição e as propriedades do solo que determinam a temperatura do solo, enquanto as condições climáticas definem as temperaturas do ar de entrada e do solo. Segundo o autor, também ocorrem flutuações na temperatura do solo, cuja amplitude diminui com o aumento da profundidade dos tubos, convergindo para um valor praticamente constante ao longo do ano. Já a vazão mássica do ar e

a temperatura do ar de saída são determinadas pelos requisitos de projeto (JANSSENS; PAEPE, 2003).

Para os parâmetros geométricos de dimensionamento do trocador de calor solo-ar, Farias (2021) aponta os seguintes:

- D : diâmetro do tubo (m);
- L : comprimento do tubo (m);
- n : número de tubos em paralelo no trocador de calor, no caso de um trocador com uma configuração em paralelo.

Primeiramente determina-se o número de tubos, para somente então calcular a taxa de fluxo através da Equação 1. Dessa forma, limitando-se a apenas 1 tubo de comprimento equivalente, o problema é reduzido a determinar o comprimento do tubo (FARIAS, 2021). A taxa de fluxo é dada por:

$$\dot{m}_{ar,tubo} = \frac{\dot{m}_{ar,total}}{n} \quad \text{Equação 1}$$

A quantidade total de calor retirado do ar ambiente e transferido para o ar no interior do tubo pode ser calculada pela Equação 2 (FARIAS, 2021):

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar,tubo} \cdot cp_{ar} \cdot (T_{ar,s} - T_{ar,e}) \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

\dot{Q} = taxa de transferência de calor (W);

cp_{ar} = calor específico do ar (J/kg·K).

A convecção entre a parede do tubo e o ar em seu interior resulta em um calor transferido que pode ser calculado pela Equação 3 (FARIAS, 2021):

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);

A = área de transferência de calor (m^2);

ΔT_{lm} = diferença de temperatura média logarítmica ($^{\circ}\text{C}$).

Pode-se calcular a diferença de temperatura média logarítmica através da Equação 4, considerando-se que $T_{solo} = T_{tubo}$ (FARIAS, 2021):

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_{ar,s} - T_{ar,e}}{\ln\left(\frac{T_{ar,e} - T_{tubo}}{T_{ar,s} - T_{tubo}}\right)} \quad \text{Equação 4}$$

Considerando-se um tubo de comprimento infinito e que o ar será resfriado/aquecido à temperatura da parede do tubo, a eficácia do trocador é dada pela Equação 5 (FARIAS, 2021):

$$\varepsilon = \frac{T_{ar,s} - T_{ar,e}}{T_{tubo} - T_{ar,e}} \quad \text{Equação 5}$$

A Equação 5 pode também ser escrita na forma da Equação 6 (FARIAS, 2021):

$$\varepsilon = 1 - e^{((-h \cdot A)/(\dot{m}_{ar} \cdot cp_{ar}))} \quad \text{Equação 6}$$

Definindo-se um grupo adimensional, chamado de número de unidades de transferência (NTU), pode-se simplificar a Equação 6, utilizando-se a Equação 7, resultando-se na Equação 8 (FARIAS, 2021). Dessa forma, NTU é definido como:

$$NTU = \frac{h \cdot A}{\dot{m}_{ar} \cdot cp_{ar}} \quad \text{Equação 7}$$

Tem-se, assim, a Equação 8, uma simplificação para a eficácia:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \quad \text{Equação 8}$$

Segundo Farias (2021), à medida que se aumenta o NTU, ocorre um aumento da eficácia, tendendo a uma estagnação quando $NTU > 3$, valor a partir do qual o ganho é relativamente pequeno. O autor também aponta algumas estratégias para se obter um NTU elevado, de forma a construir um trocador de calor solo-ar mais eficaz, fazendo-se variar os três seguintes parâmetros:

- h : coeficiente de convecção do ar no interior do tubo ($W/m^2 \cdot K$);
- A : superfície de transferência de calor do tubo (m^2);
- \dot{m}_{ar} : vazão mássica do ar (kg/s).

Farias (2021) também afirma que, em função do diâmetro (D) e do comprimento (L), pode-se obter a área de transferência de calor, por meio da Equação 9:

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad \text{Equação 9}$$

Por meio da Equação 10 pode-se obter o valor do coeficiente de convecção no interior do tubo (FARIAS, 2021), dado por:

$$h = Nu \cdot \lambda / D \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

Nu = número de Nusselt (adimensional);

λ = condutividade térmica do ar ($W/m \cdot K$).

O número de Nusselt representa a razão entre transferências de calor por convecção e por condução. Para um escoamento laminar no interior de um tubo, a uma temperatura superficial constante, Nu assume o valor e condição dispostos na Equação 11a. No caso de escoamentos turbulentos no interior de tubos circulares de superfície interna lisa, usam-se as equações 11b e 11c, com a restrição 11d (FARIAS, 2021). Assim, para escoamentos laminares, tem-se:

$$Nu = 3,66 \quad \text{se} \quad Re < 2300 \quad \text{Equação 11a}$$

Já, no caso de escoamentos turbulentos, tem-se:

$$Nu = \frac{(\xi/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad \text{Equação 11b}$$

Onde:

$$\xi = (1,82 \cdot \log(Re) - 1,64)^{-2} \quad \text{Equação 11c}$$

Com as seguintes restrições:

$$2300 \leq Re < 5 \times 10^6 \quad e \quad 0,5 < Pr < 10^6 \quad \text{Equação 11d}$$

Re é o número de Reynolds (adimensional), o qual pode ser calculado por meio da Equação 12:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

V = velocidade de escoamento do ar (m/s);

ν = viscosidade cinemática do ar (m²/s).

Pr constitui o número de Prandtl (adimensional), sendo considerado entre 0,7 a 0,8 para o ar.

Tem-se também que a vazão mássica do ar pode ser calculada pela Equação 13:

$$\dot{m}_{ar} = \rho \cdot V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{Equação 13}$$

Em que ρ é a massa específica do ar, em kg/m³.

Farias (2021) ressalta que ocorre uma variação linear entre NTU e o comprimento L , sendo o último um parâmetro independente. Entretanto, quando se altera os valores do diâmetro e da vazão mássica, a velocidade do ar nos tubos também é alterada, resultando na variação do

número de Reynolds, o que implica que D e \dot{m}_{ar} , embora tenham impacto sobre o NTU, não são parâmetros independentes como o comprimento L .

No caso do diâmetro D , de forma geral, à medida que se diminui o seu valor, a eficiência aumenta; entretanto, fluxos maiores de ar diminuem a eficiência. Dessa forma, uma boa estratégia é colocar vários tubos de diâmetro pequeno em paralelo, dividindo-se a taxa de fluxo entre eles. Tubos com diâmetro pequeno e comprimento elevado também são favoráveis à transferência de calor, entretanto resultam na necessidade de insufladores mais potentes (que consomem mais energia), o que é uma desvantagem. Portanto deve-se fazer uma análise da perda de carga total dos tubos, resultado da soma das perdas de carga localizadas às perdas de carga distribuídas (FARIAS, 2021).

Farias (2021) expressa a perda de carga distribuída no tubo (reto) por meio da Equação 14a:

$$\Delta p = \xi \cdot \rho \cdot \frac{L \cdot V^2}{2 \cdot D} \quad \text{Equação 14a}$$

Tendo-se as restrições da Equação 14b:

$$\xi = (1,82 \cdot \log(Re) - 1,64)^{-2} \text{ se } Re \geq 2300 \text{ e } \xi = \frac{64}{Re} \text{ se } Re < 2300 \quad \text{Equação 14b}$$

Em relação à queda de pressão, o comprimento L também atua como um parâmetro independente, tendo uma influência linear. A vazão e o diâmetro têm influência combinada, de modo que, tanto um diâmetro grande quanto a uma pequena vazão, resultam em menores perdas de carga. Pode-se dizer que um grande número de tubos é benéfico ao sistema, independentemente da vazão e do diâmetro; no entanto, com uma combinação estratégica de comprimento e diâmetro do tubo, pode-se obter uma otimização do sistema, de forma e reduzir os custos de implantação e melhorar o funcionamento do sistema (FARIAS, 2021).

Elementos como conexões, joelhos e válvulas são necessários ao funcionamento do sistema. Entretanto, esses elementos oferecem resistência à passagem do ar nos tubos, ou seja, cada um

desses adicionais é uma perda de carga localizada, podendo ser calculadas pela Equação 15 (FARIAS, 2021). Assim, a perda de carga localizada é obtida por:

$$\Delta P_L = k \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad \text{Equação 15}$$

Onde k é o coeficiente de carga localizada, o qual é definido conforme o somatório dos componentes constituintes do trocador de calor.

Farias (2021) também afirma que, conforme a configuração do sistema (tubos dispostos em paralelo ou em série), há diferença nos valores de k .

A configuração em paralelo implica os seguintes valores:

- 2 curvas de 90° com flange: $k = 0,6$;
- 1 canto de descarga no tubo acessório: $k = 1,0$;
- 1 canto de descarga na entrada dos tubos paralelos: $k = 0,5$;
- 1 canto de descarga dos tubos paralelos: $k = 1,0$.

A configuração em série implica os seguintes valores:

- 2 curvas de 90° com flange: $k = 0,6$;
- 1 redução para o tubo acessório: $k = 0,5$;
- 1 canto de descarga dos tubos em série: $k = 1,0$;
- 6 curvas de 180°: $k = 1,2$.

Por fim, Farias (2021) apresenta também uma equação para o cálculo da potência hidráulica, que é a potência responsável pelo escoamento do ar desde a entrada até a saída do trocador de calor. A movimentação do ar é feita por um insuflador. A potência hidráulica é dada pela Equação 16:

$$P_h = \dot{m} \cdot g \cdot H = \dot{m} \cdot g \cdot \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} = \rho \cdot \dot{V} \cdot \frac{\Delta P}{\rho} = \dot{V} \cdot \Delta P \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

P_h = potência hidráulica (W);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

H = altura de elevação / altura de carga (m);

ΔP = perda de carga (Pa);

\dot{V} = vazão volumétrica (m^3/s).

3.6 PARÂMETROS DE PROJETO

Definida a metodologia e o equacionamento, traz-se os parâmetros de projeto propostos por Farias (2021). O final deste tópico traz também outros parâmetros, não referentes a esta metodologia, mas que podem contribuir de forma positiva ao sistema a ser implantado, agregando características benéficas ao seu funcionamento.

Considerando-se a metodologia e o equacionamento apresentados anteriormente, tem-se por parâmetros de projeto, os seguintes: vazão mássica do ar; temperatura do ar na entrada do trocador de calor; temperatura de saída do ar do trocador de calor (para o ambiente a ser condicionado); temperatura da parede interna do trocador de calor. Os parâmetros geométricos são: diâmetro do tubo; comprimento do tubo; número de tubos em paralelo (no caso de configuração em paralelo).

3.6.1 Vazão mássica do ar

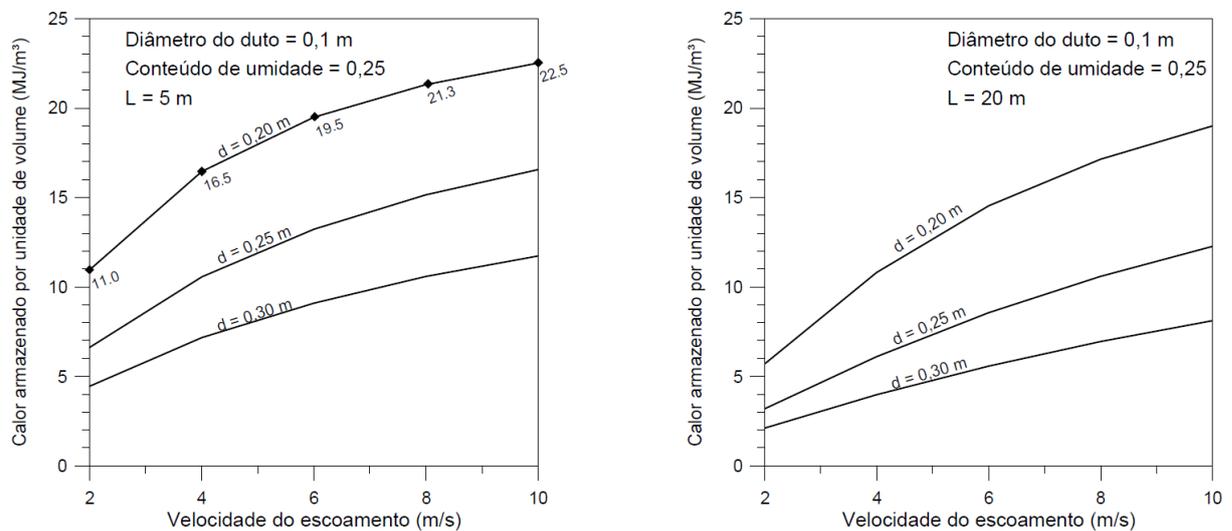
Segundo a ANVISA (2003), a taxa de renovação do ar adequada de ambientes climatizados deve ter um valor mínimo de 27 m^3 /hora/pessoa (com exceção ao caso de ambientes de alta rotatividade de pessoas, nos quais pode ser admitida uma taxa de 17 m^3 /hora/pessoa).

Considerando-se a massa específica do ar $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$, tem-se uma vazão mássica mínima adequada por pessoa $\dot{m}_{ar/pessoa} = 1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{27 \text{ m}^3}{\text{hora}} \times \frac{\text{hora}}{3600 \text{ s}} = 0,0061 \text{ kg/s}$.

- **Velocidade do ar no interior dos tubos**

Quanto maior a velocidade de escoamento do ar no interior dos tubos, maior o fluxo de massa que realizará as trocas de calor e, portanto, maiores serão as trocas térmicas entre o solo e o ar (MUSSKOPF, 2006). No entanto, segundo Lombardi (2005), não existe uma linearidade nesse efeito de aumento de trocas térmicas, como pode-se inferir da Figura 14, em que “d” é a distância entre centros dos tubos.

Figura 14 – Calor armazenado no solo em função da velocidade de escoamento do ar



(fonte: LOMBARDI, 2005)

Gauthier *et al.* (1997) recomendam uma velocidade máxima de escoamento de 4 m/s, baseando sua pesquisa em modelagens utilizando-se dutos isolados; os autores afirmam também que velocidades maiores acabam sendo afetadas por um acréscimo exponencial na potência de sopro, a qual varia quadraticamente com a velocidade de escoamento.

Segundo Holmuller e Lachal (2001), no inverno, quando as temperaturas são menores, a renovação do ar no ambiente tem um efeito negativo na eficiência do sistema, devendo-se

manter, preferencialmente, níveis mínimos (ou seja, a vazão/velocidade do ar deve ser menor nessa estação); já no caso de temperaturas maiores, típicas do verão, observa-se um efeito positivo na eficiência do sistema em relação à renovação do ar (ou seja, em períodos de verão, o ideal é que se tenha uma vazão/velocidade do ar maior).

3.6.2 Temperatura do ar de entrada

A temperatura de entrada do ar no trocador de calor tem como referência a temperatura ambiente média do local de implantação, sofrendo variações que oscilam de acordo com a temperatura ambiente da localidade (FONSECA, 2002). A Tabela 2 indica os dados de temperatura média, anual e diária de diferentes cidades do Brasil. Para Porto Alegre, tem-se uma amplitude anual de 10,6°C (o maior entre os valores dessa amostra) e uma amplitude diária de 8,0°C (o segundo maior entre os valores dessa amostra).

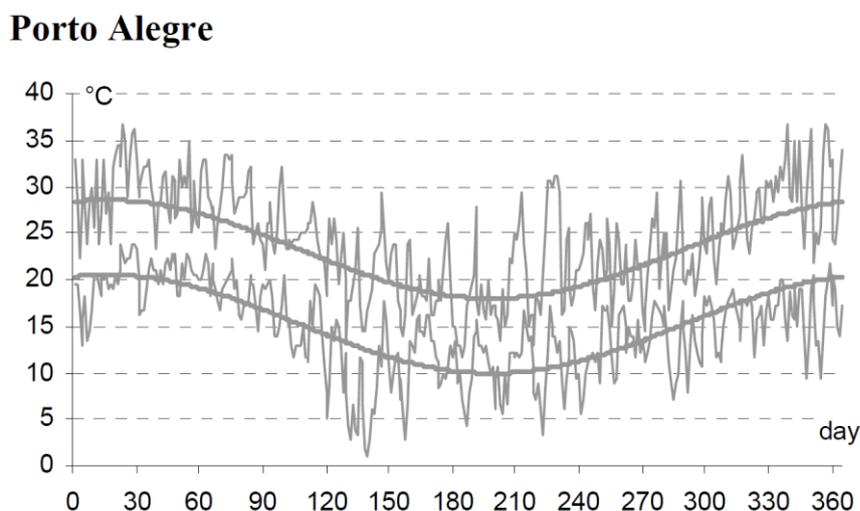
Tabela 2 – Amplitudes térmicas e temperaturas médias anuais de cidades brasileiras

Cidade	Temperatura média (°C)	Amplitude no ano (K)	Amplitude no dia (K)
Brasília	20,7	3,2	9,5
São Paulo	18,8	5,4	7,0
Rio de Janeiro	23,6	6,0	5,0
Recife	25,7	2,6	3,0
Florianópolis	20,7	7,7	5,7
Porto Alegre	19,2	10,6	8,0

(fonte: adaptado de HOLLMULLER *et al.*, 2006)

A temperatura do ar também varia diariamente, de acordo com a temperatura ambiente do local. Devido ao fato de pretender-se fazer o projeto demonstrativo do trocador de calor de que se refere este trabalho, na cidade de Porto Alegre – RS, buscou-se compilar dados de temperatura diária referentes a esta localidade, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Extremos das temperaturas diárias em Porto Alegre/RS durante um ano típico



(fonte: HOLLMULLER *et al.*, 2006)

3.6.3 Temperatura do ar de saída

A temperatura do ar de saída do trocador de calor solo-ar é um parâmetro que depende da eficácia das trocas de calor entre o ar que circula no interior dos tubos e a temperatura das paredes dos tubos, a qual depende, por sua vez, da temperatura do solo circundante aos tubos. Assim, pode-se afirmar que a temperatura do ar de saída do trocador de calor depende da profundidade em que estão enterrados os tubos.

Devido ao fato deste trabalho estar objetivando tanto a otimização do sistema a que se propõe dimensionar, quanto a simplificação das equações de dimensionamento, a temperatura do ar de saída do trocador de calor será igualada à temperatura do solo na profundidade de enterramento dos tubos (conforme o tópico 3.5.4). Dessa forma, de maneira simplificada, assume-se que o as trocas de calor entre o ar nos tubos e o solo têm 100% de eficiência para uma profundidade igual ou superior a 4 metros, resultando na igualdade: $T_{ar,s} = T_{solo}$. Ao utilizar uma profundidade menor, deve-se fazer a correção da temperatura do ar de saída.

3.6.4 Temperatura do solo

Diferentemente do uso da energia geotérmica de grandes profundidades, em que se obtém calor proveniente das elevadas temperaturas do núcleo da terra e do magma, no solo superficial (exceto nas regiões de afloramento de calor), nas camadas de 0,1 m a 1,0 m de profundidade ocorrem variações diárias de temperatura, de acordo com a difusividade térmica, enquanto que, para profundidades de até 20 m, ocorrem apenas variações anuais – em ambas as situações, em torno da média anual. Comparada à temperatura do ar nos mesmos períodos, essa variação é pequena, tornando-se ideal o uso do solo como “reservatório térmico” para o condicionamento de ambientes em locais que têm climas com dias quentes e noites frias ou que têm invernos e verões rigorosos (MUSSKOPF, 2006).

A amplitude da variação da temperatura no solo diminui exponencialmente à medida em que se aumenta a profundidade e ocorre uma defasagem no tempo quando comparado ao que acontece na superfície. Quanto à onda de temperatura anual, a defasagem tem um valor médio de 22 dias/m. Estudos também apontam que a temperatura média anual e a amplitude são maiores em um solo sem a cobertura vegetal, quando comparado a um solo coberto de grama rala (VAZ, 2011).

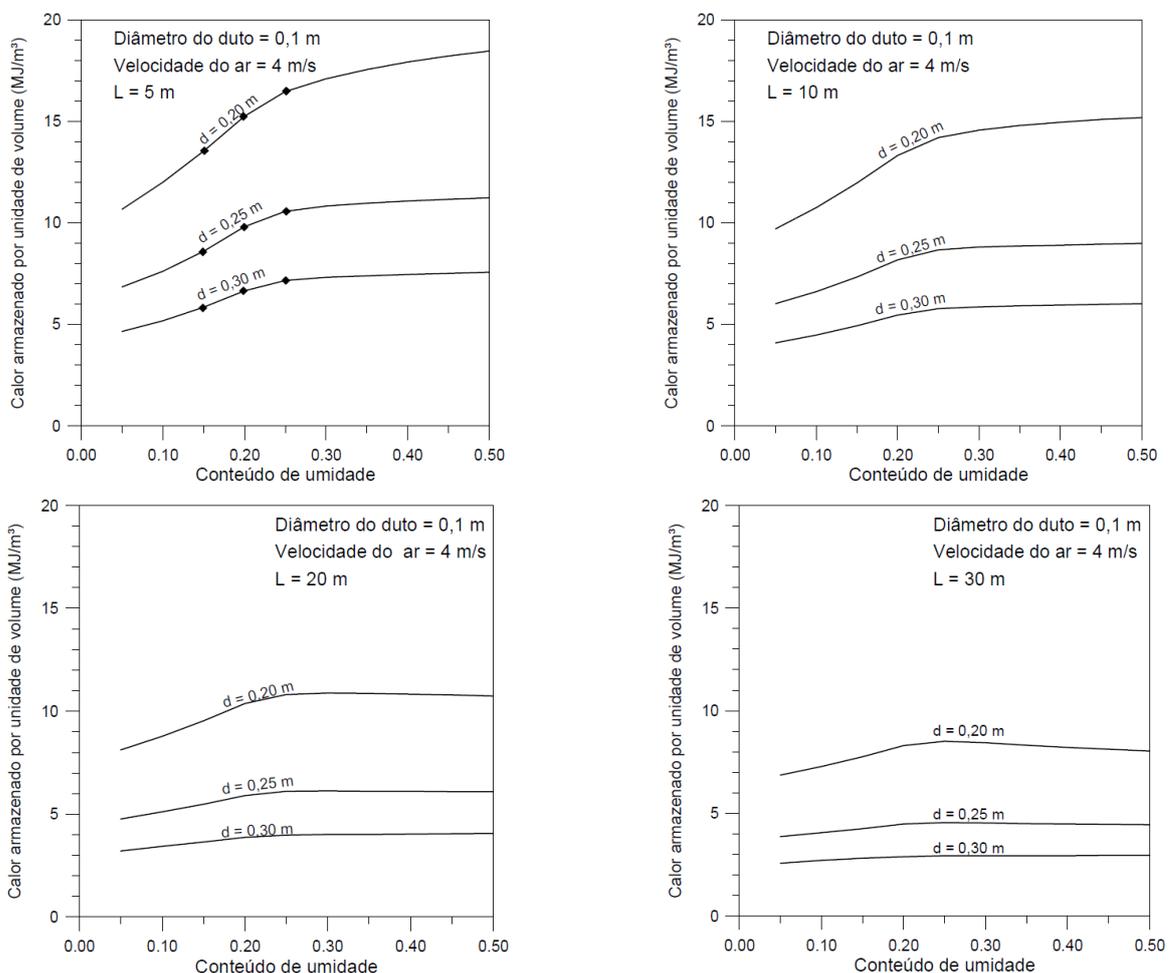
- **Tipo de solo**

O solo é o fator mais importante nos sistemas de trocador de calor; as variações de temperatura tanto do solo quanto do ar ambiente são cíclicas, assumindo formatos senoidais similares (MUSSKOPF, 2006). O conhecimento do perfil da variação diária e anual da temperatura do solo a várias profundidades é fundamental para que se possa projetar corretamente os sistemas de captação, tanto direta quanto indireta, do calor do solo (MIHALAKAKOU; SANTAMOURIS; ASIMAKOPOULOS, 1992). Os autores também afirmam que ocorre um armazenamento de calor latente no solo, podendo ficar retido por um período que pode variar entre 10 e 12 horas, tornando possível que quantidades de calor que sejam armazenadas durante as horas do dia, possam ser utilizadas à noite.

Quanto maior a condutividade, mais eficiente será a troca térmica, o que faz com que o tipo de solo seja um fator muito relevante nos processos de trocas de calor com as paredes dos tubos. Além disso, a umidade aumenta a capacidade calorífica do solo, tornando-se uma propriedade importante, sobretudo nos casos de tubos menores ou menos espaçados (MUSSKOPF, 2006).

Entretanto, como aponta Lombardi (2005), em um estudo utilizando tubos de 10 cm de diâmetro, velocidade do ar abaixo de 4 m/s e solos com umidade acima de 25%, para tubos com distância entre eixos maior ou igual a 25 cm ou que tenham grandes comprimentos, a umidade deixa de ser um fator importante, pois seu efeito deixa de ser sentido nessas condições, como pode-se observar na Figura 16, em que “d” é a distância entre centros dos tubos.

Figura 16 – Calor armazenado no solo em função do teor de umidade



(fonte: LOMBARDI, 2005)

Solos com baixa difusividade térmica são preferíveis nas situações em que ocorrem grandes amplitudes térmicas diárias, possibilitando-se a utilização do calor armazenado no solo (MUSSKOPF, 2006). Já nos locais onde o clima é predominantemente frio ou predominantemente quente, solos que têm maior dissipação de calor são mais adequados (LOMBARDI, 2005).

Angnes (2018) destaca também a importância de se conhecer o solo em que se pretende instalar o sistema, dispondo de informações como sua composição granulométrica, perfil geotécnico, grau de saturação, perfil da variação da temperatura, inventário de poços subterrâneos na região, nível de lençol freático, entre outras informações.

- **Cobertura do solo**

Os trocadores de calor são afetados pelo tipo de cobertura do solo, sofrendo variações em seu desempenho, conforme se utilizam superfícies com características diferentes (SANTAMOURIS *et al.*, 1996).

Musskopf (2006) afirma que a profundidade necessária para os tubos dos trocadores de calor varia conforme o tipo de cobertura do solo, indicando uma profundidade de 0,5 metros para áreas sombreadas, e profundidades entre 1 e 2 metros para locais que tenham uma superfície que promove uma grande absorção de radiação solar.

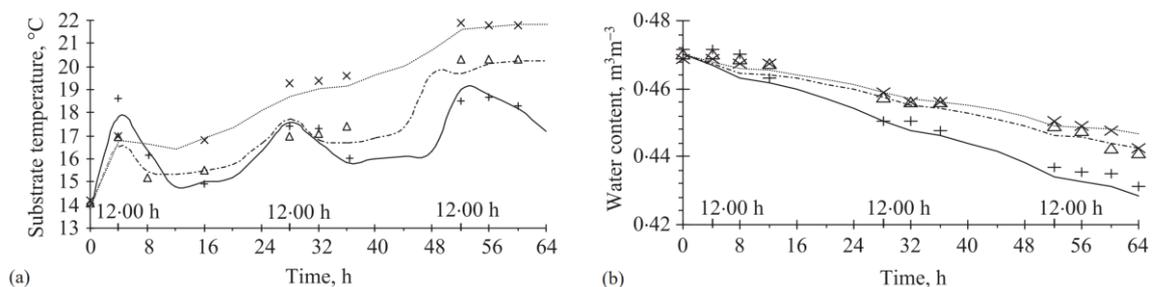
Em um estudo de solos com coberturas vegetais realizado em Atenas, constatou-se que, nos períodos de inverno, os solos cobertos são mais frios (com temperaturas entre 1°C a 1,5°C menores em relação aos solos sem cobertura). No verão, entretanto, a cobertura vegetal torna-se uma vantagem, pois as temperaturas médias registradas eram 8°C menores em relação às temperaturas encontradas nos solos expostos (atingindo até mesmo a uma diferença de 12°C nos dias de maior insolação). Observou-se também que em períodos noturnos os solos cobertos eram de 1°C a 2°C mais quentes (MIHALAKAKOU; LEWIS; SANTAMOURIS, 1996). Os autores também concluem que ocorre uma redução significativa nas variações térmicas dos solos, quando estes têm uma cobertura vegetal.

• Profundidade

A profundidade é determinante na variação da temperatura do solo, sendo que, quanto maior for a profundidade, menor será a variação da temperatura. Isso ocorre devido ao fato de que a espessura da camada de solo é proporcional à capacidade calorífica e, portanto, à capacidade de resfriamento ou aquecimento (MUSSKOPF, 2006). Segundo Santamouris et al. (1996), na profundidade de apenas alguns metros, o subsolo oferece uma expressiva diminuição das variações diárias e sazonais da temperatura. Abaixo de 0,15 m, a influência da radiação solar diária é insignificante na temperatura do solo; abaixo de 0,25 m a influência da umidade também começa a se tornar desprezível (KURPASKA *et al.*, 2004). A Figura 17 apresenta a temperatura e o conteúdo de umidade do subsolo para diferentes valores de profundidade, e a Figura 18 apresenta o comportamento esperado (ideal) da temperatura do solo e do ar para trocadores de calor geotérmico.

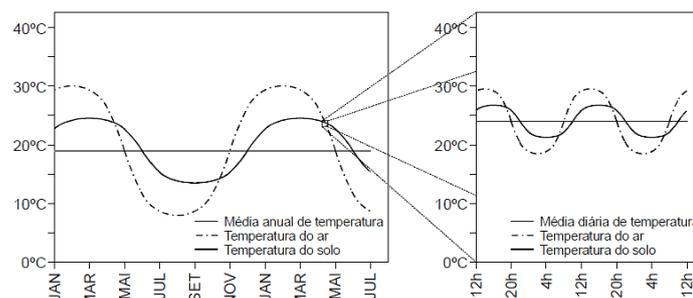
Figura 17 – Resultados medidos (símbolos) e calculados (linhas) para: a) temperatura do solo e b) conteúdo de umidade do solo

(legenda: ____+: 5 cm; ----Δ: 15 cm;×: 25 cm)



(fonte: KURPASKA *et al.*, 2004)

Figura 18 – Curva ideal anual e diária de temperatura do solo e do ar



(fonte: MUSSKOPF, 2006)

Diversos experimentos de medição e análise do comportamento da temperatura com o passar do tempo, de acordo com a profundidade no local analisado, comprovam que a variação da temperatura do solo diminui de acordo com o aumento da profundidade. A Tabela 3 apresenta dados de um experimento de medição das temperaturas a diferentes profundidades na cidade de Fátima do Sul – MS, podendo-se constatar que as temperaturas no subsolo são mais estáveis, atingindo menores amplitudes térmicas à medida em que se aumenta a profundidade.

Tabela 3 – Variação da temperatura de acordo com a profundidade do solo

Extremos de temperatura e variações (°C)					
	Sensor 0,0 m	Sensor 1,5 m	Sensor 3,0 m	Sensor 4,5 m	Sensor 6,0 m
$T_{máxima}$	42,13	23,38	24,5	25,38	25,38
$T_{mínima}$	4,5	19,88	23,38	24,5	24,63
ΔT	37,63	3,5	1,12	0,88	0,75

(fonte: MEDEIROS; OMIDO, 2018)

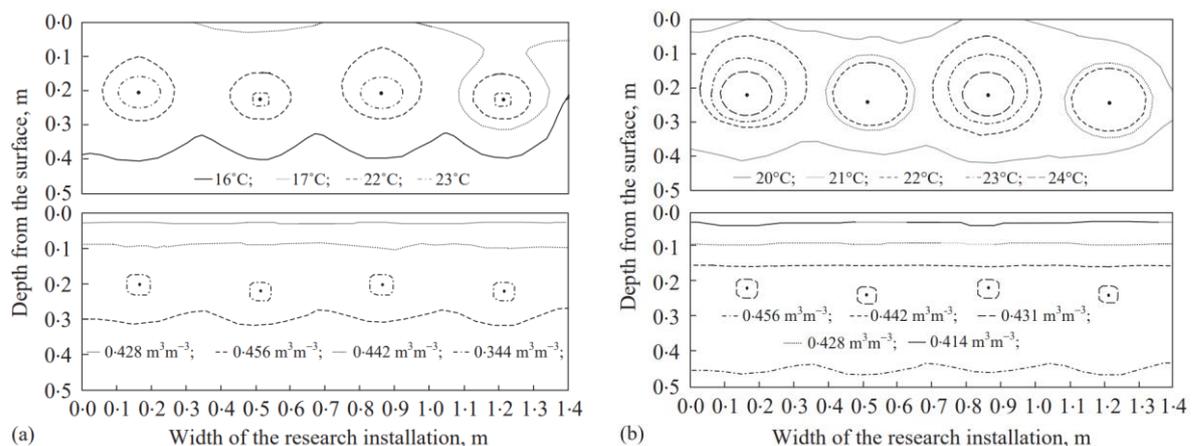
Bharadwaj e Bansal (1981) também fizeram uma análise das variações diárias e anuais das distribuições de temperatura do solo, considerando diferentes combinações de insolação e umidade superficial do solo em Nova Deli, no ano 1974, concluindo que para um ciclo diário, a temperatura do solo varia até a profundidade de 0,15 m, porém para um ciclo anual, varia até a profundidade de 4 m. Já Musskopf (2006) afirma que, para o sistema não ser afetado pelas variações diárias de temperatura, o ideal é que os tubos sejam instalados a uma profundidade entre 2 e 3 metros; o autor afirma também que, no caso de sistemas de resfriamento, a profundidade ideal é menor, sendo meio metro um valor satisfatório.

A difusividade do solo tem influência sobre as profundidades que são afetadas pelos ciclos anuais e diários de temperatura, sendo que a variação anual impacta em uma profundidade cerca de 15 vezes maior do que a impactada pelas variações diárias. Profundidades iguais ou superiores a estas têm uma temperatura constante e próxima à temperatura média anual da região; isso significa que, tanto a variação anual quanto diária, apresentam um formato senoidal, sendo a primeira relacionada à temperatura média anual e a segunda, à temperatura média diária

(VAZ, 2011), similar à Figura 18. Musskopf (2006) resalta que os registros de medição de temperatura a diversas profundidades têm limitações espaciais e temporais, ou seja, são dados que podem ser utilizados localmente, apenas.

Após ser efetuada a instalação do sistema de tubos no interior do solo, o comportamento térmico deste material sofre modificações, passando a ocorrer um aumento da temperatura do subsolo, resultado de trocas de calor de duas naturezas distintas: a primeira é o calor dos tubos (e do ar que circula em seu interior) e a segunda é o calor proveniente da radiação solar (MUSSKOPF, 2006). Na Figura 19, em que as abscissas apresentam a largura e as ordenadas apresentam a profundidade, pode-se observar esse comportamento do solo.

Figura 19 – Temperatura e umidade do solo após: a) 48 horas e b) 64 horas da instalação do sistema de tubos



(fonte: KURPASKA *et al.*, 2004)

- **Temperatura da parede interna do trocador de calor**

Farias (2021) mostra em seu trabalho que a temperatura da parede do trocador de calor corresponde à temperatura do solo, na profundidade em que se encontra o tubo enterrado (no caso de sua pesquisa, 4 metros, que, segundo o autor, é a profundidade em que ocorre a inércia térmica).

3.6.5 Diâmetro do tubo

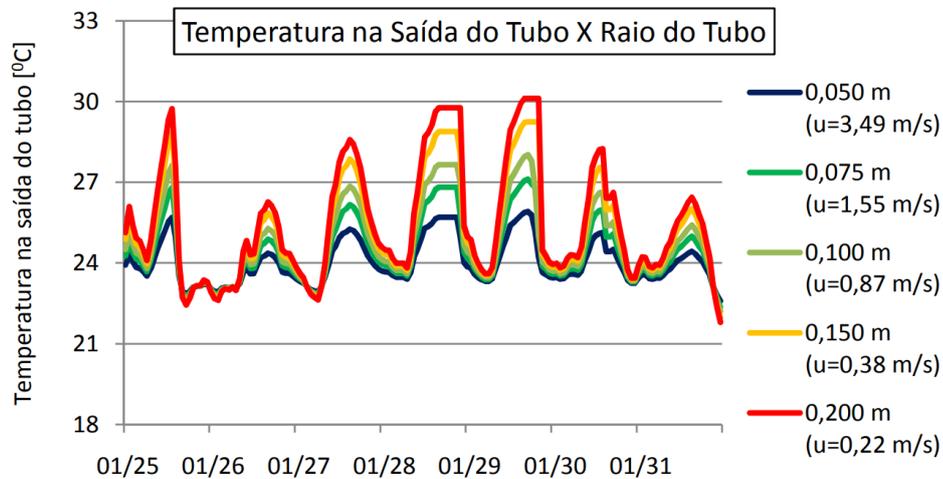
Santamouris *et al.* (1996) realizaram ensaios utilizando tubos de diferentes diâmetros (12 cm, 18 cm e 25 cm), fazendo circular ar a uma velocidade constante em seu interior. Os resultados dos ensaios permitem chegar à conclusão de que, aumentando-se o diâmetro do tubo, ocorre uma diminuição da transferência de calor por convecção em seu interior, o que implica uma menor eficiência nas trocas térmicas entre o ar e o solo, tendo impacto negativo na capacidade do sistema.

Musskopf (2006) também afirma que, devido ao maior volume de ar circulante no interior dos tubos para uma mesma velocidade de circulação, o aumento no diâmetro reduz a capacidade das transferências térmicas. A este respeito, tenha-se em mente que quanto maior o diâmetro do tubo, menor a razão entre circunferência e área transversal do tubo, ou seja, menor a proporção entre superfície de tubo e volume de ar.

Apresentando resultados semelhantes em sua pesquisa, Lombardi (2005) observou que, para menores diâmetros dos tubos, existe a ocorrência de diferenças mais acentuadas nas trocas de calor com o solo, em relação aos tubos de maior diâmetro. Em contrapartida, os resultados da pesquisa também mostram que nos tubos de maior diâmetro, caso o comprimento do tubo seja aumentado, a perda de eficiência é menor.

A Figura 20 apresenta o efeito da variação do diâmetro do tubo sobre a temperatura do ar de saída do sistema. Na simulação, a vazão é a mesma para todos os tubos, variando-se, porém, a velocidade do ar circulante nos tubos.

Figura 20 – Variação da temperatura de saída em função do raio da tubulação



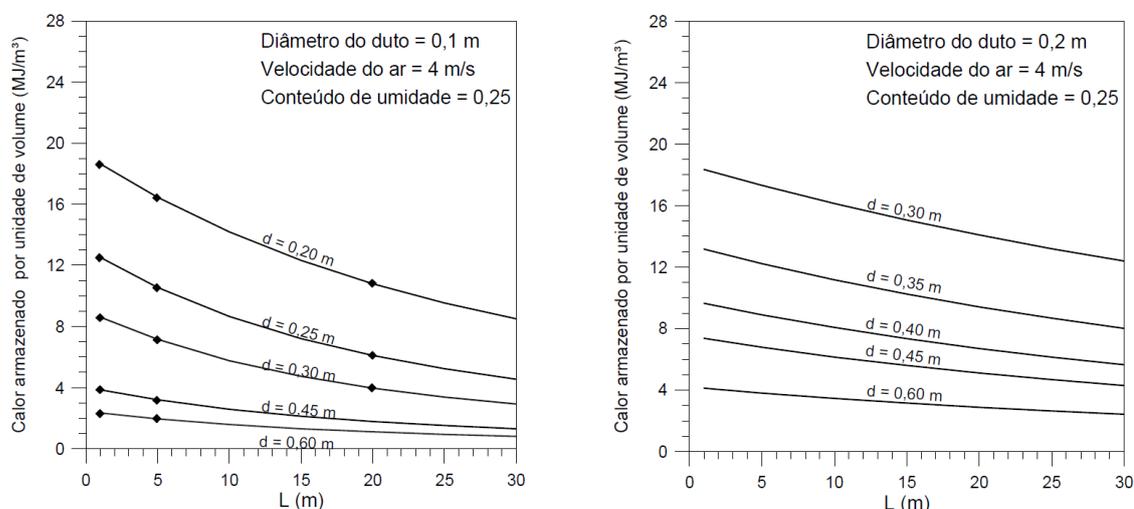
(fonte: SCHULZ, 2011)

Por fim, Farias (2021) propõe arbitrar-se um valor para o diâmetro do tubo, igualando-o, inicialmente, ao diâmetro comercial $D = 0,20\text{ m}$, fazendo-o variar entre os diâmetros comerciais existentes (ou seja, variando de 0,019 a 0,20 m). Assim, com o auxílio de uma planilha eletrônica contendo toda a formulação da metodologia utilizada, define-se a configuração mais eficiente, baseando-se nos parâmetros calculados. Devido ao fato de se estar utilizando, neste trabalho, a metodologia proposta pelo mesmo autor, esse será o método de determinação do diâmetro dos tubos do trocador de calor.

3.6.6 Comprimento do tubo

O comprimento dos tubos é diretamente proporcional à área de contato das paredes dos tubos com o solo, a qual tem uma relação direta com as trocas térmicas com o solo (SANTAMOURIS *et al.*, 1996). Segundo Lombardi (2005), entretanto, ocorre uma diminuição das trocas térmicas entre o ar e o solo ao longo do tubo, pois, à medida que o ar circula no interior do duto, a diferença entre a sua temperatura e a temperatura do solo diminui. Assim, existe um “ponto de saturação”, o qual ocorre quando não há mais diferença entre a temperatura das paredes do tubo e o ar que circula no interior do mesmo (KABASHNIKOV *et al.*, 2002). Observe-se o gráfico apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Gráfico do calor armazenado em função do comprimento do tubo para: a) diâmetro de 0,1 m e b) diâmetro de 0,2 m



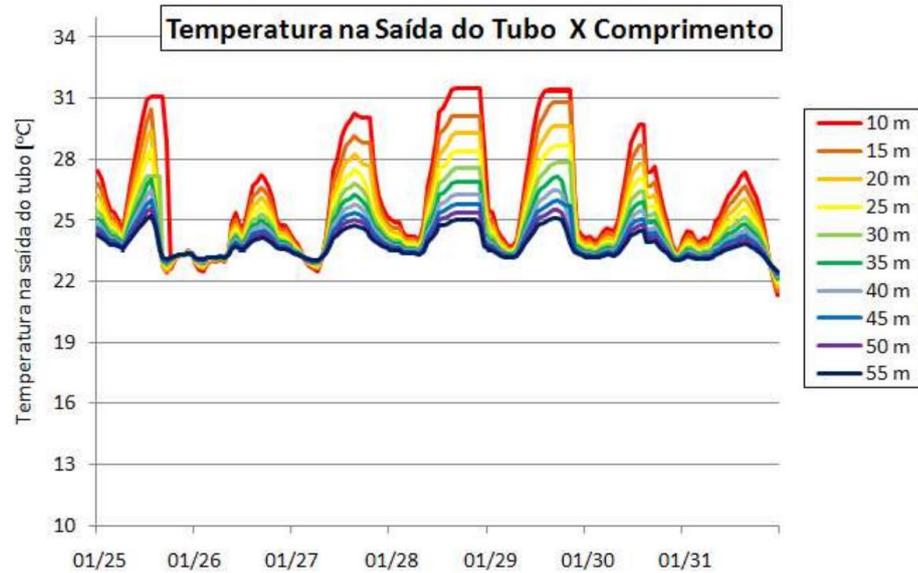
(fonte: LOMBARDI, 2005)

Por meio de um estudo utilizando tubos com 10,8 cm de diâmetro, Gauthier *et al.* (1997) demonstraram que comprimentos entre 5 e 20 metros são o ideal para que as trocas de calor aconteçam. Os mesmos autores classificam como “de grande comprimento” os tubos com mais de 20 metros. Neste caso, para o referido diâmetro, 20 metros é o comprimento em que ocorre o ponto de saturação. Angnes (2018) também afirma que, ao aumentar o comprimento da tubulação, a transferência de calor entre ela e o solo tende a ocorrer de modo mais lento.

Entretanto, para tubos com diâmetros maiores, o limite de saturação é maior, podendo ultrapassar os 20 metros apontados anteriormente. Tubos mais largos têm menos perda de eficiência relacionada ao aumento do comprimento, quando comparados a tubos mais finos. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento da vazão de ar no interior do tubo e ao fato de apresentar uma área superficial maior (LOMBARDI, 2005).

A Figura 22 apresenta a variação da temperatura em relação ao comprimento do tubo no mês de janeiro, em uma semana típica de verão, na cidade de Porto Alegre – RS (local cuja temperatura média é por volta dos 25°C).

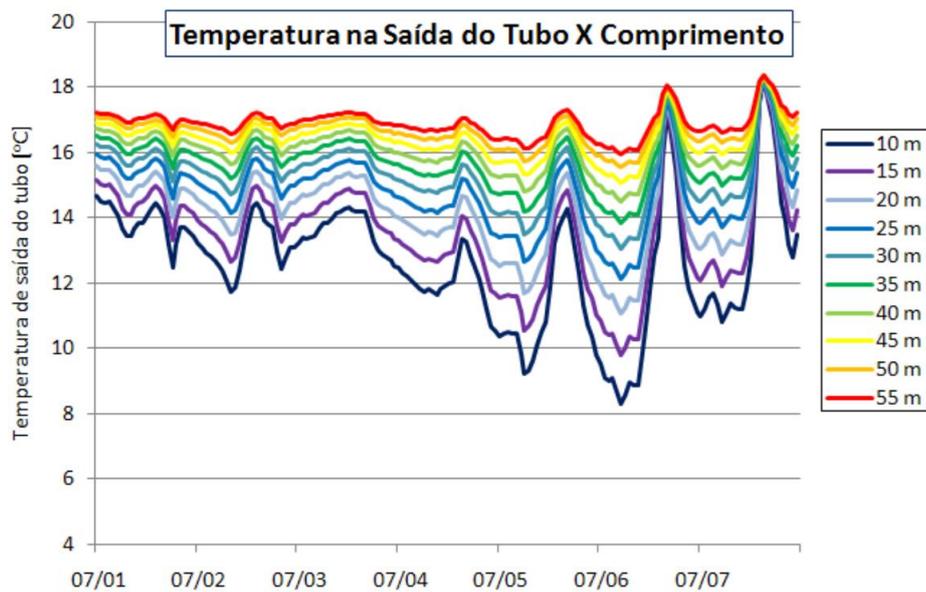
Figura 22 – Variação da temperatura de saída do tubo em função de seu comprimento, na estação de verão em Porto Alegre



(fonte: SCHULZ, 2011)

Nos meses de inverno ocorre uma situação semelhante, conforme mostra a Figura 23. Tenha em mente que a temperatura média, neste caso é de 14,5°C.

Figura 23 – Variação da temperatura de saída do tubo em função de seu comprimento, na estação de inverno em Porto Alegre



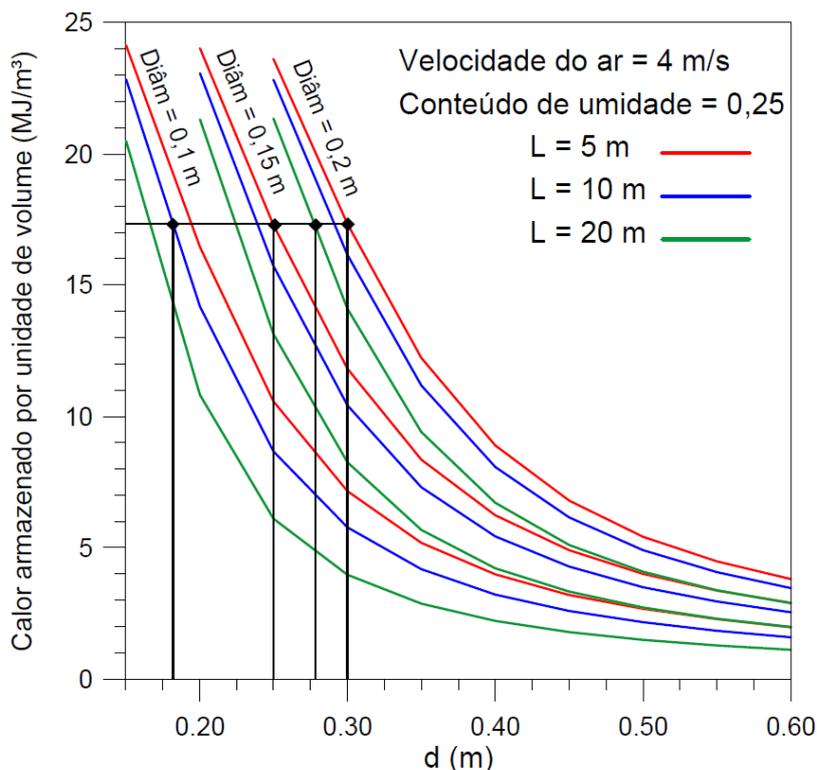
(fonte: SCHULZ, 2011)

3.6.7 Distanciamento entre tubos

Tubos menos distanciados tendem a deixar o funcionamento do sistema menos eficiente, sendo da ordem de 5% a 15% a perda da capacidade de troca de calor por metro; quando dispostos a até 1,00 metro de espaçamento, podem reduzir a capacidade dos solos, quando comparados a sistemas com espaçamento infinito, entretanto a redução é pequena (MUSSKOPF, 2006).

Segundo Kurupaska *et al.* (2004), o diâmetro não exerce influência significativa em relação aos efeitos sentidos pelo afastamento dos tubos. Lombardi (2005) também aponta que, no caso de uma proximidade muito grande entre tubos, o solo sofre uma variação de temperatura muito rápida, perdendo a sua eficiência como trocador de calor, caso sua difusividade térmica não seja adequada. A Figura 24 expressa, esse efeito da proximidade entre tubos.

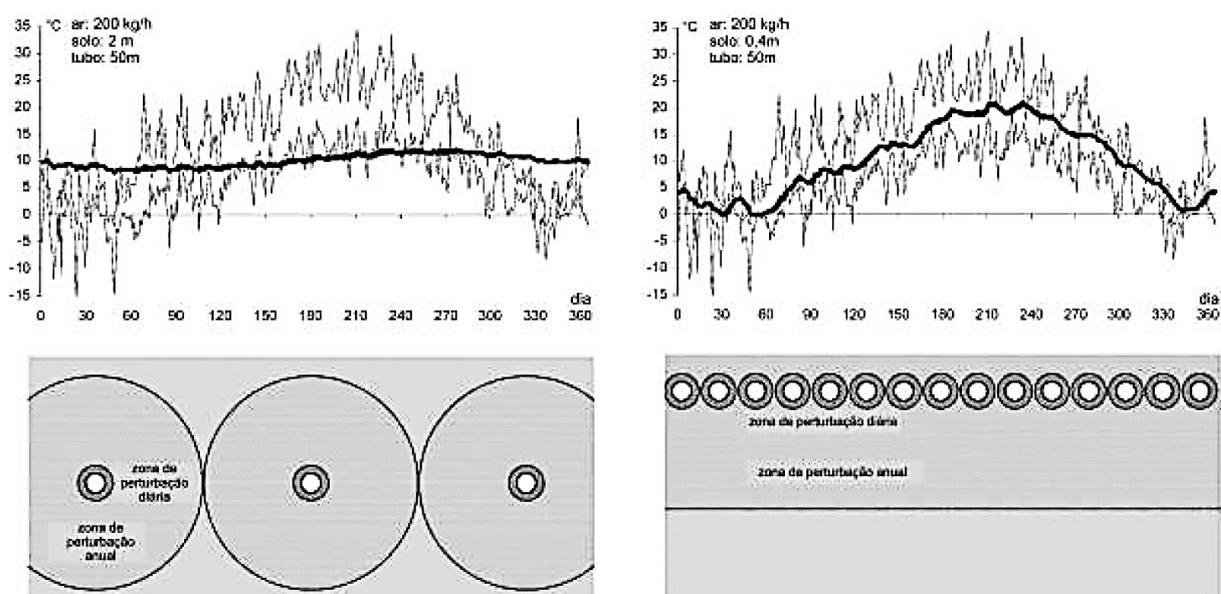
Figura 24 – Calor armazenado no solo em função da distância entre os eixos dos tubos (d)



(fonte: LOMBARDI, 2005)

Segundo Hollmuller (2004), existe diferença no efeito sofrido pelo solo quando se busca aquecer ou esfriar o ar: no caso do aquecimento do ar, deve-se objetivar um distanciamento equivalente à zona de perturbação da temperatura variando ao longo do ano; no caso de resfriamento do ar, pode-se ter um espaçamento menor, resultando em uma zona de perturbação linear ao longo do ano. Esses efeitos podem ser observados na Figura 25.

Figura 25 – Distanciamento ideal entre tubos para a situação de: a) pré-aquecimento e b) pré-refrigeração e das temperaturas máxima, mínima e interna



(fonte: adaptado de HOLLMULLER *et al.*, 2004)

3.6.8 Outras considerações

Este último tópico apresenta outros parâmetros de projeto, não referentes a esta metodologia, mas que podem contribuir para um melhor funcionamento do sistema a ser implantado, agregando características específicas, conforme descrito abaixo.

- **Material dos tubos**

Na atualidade, os materiais mais comuns para a fabricação de tubos são de três categorias diferentes: polímero (PVC), concreto e metal (aço), cujas condutividades térmicas são, respectivamente, 0,2 W/mK, 1,8 W/mK e 45,3 W/mK (ANGNES, 2018). Contudo, Ascione,

Bellia e Minichiello (2011) utilizaram tubos fabricados nos três diferentes materiais, submetendo-os à análise de eficiência, mas, diferentemente do efeito esperado no experimento, mesmo com tubos constituídos de materiais diferentes e com valores de condutividade térmica muito diferentes, o comportamento dos sistemas como um todo foi quase idêntico. Shulz (2011) realizou um estudo semelhante, obtendo resultados que permitem chegar-se à mesma conclusão.

Portanto, o material de que o tubo é fabricado não exerce um efeito perceptível sobre a eficiência das trocas de temperatura do sistema. Entretanto, como bem ressaltou Angnes (2018), a escolha do material é estratégica, pois é determinante de outros fatores importantes, como custo, durabilidade e resistência à corrosão. Duarte (2011) resalta que em sistemas em que ocorre contato direto com a água é comum a escolha de tubos de PVC, devido ao fato deste material ter uma maior resistência à corrosão comparado a tubulações metálicas, além de possuir superioridade em relação à estanqueidade à água, quando comparado ao concreto, que é um material mais poroso.

Em contrapartida, tubulações de concreto não extraem tão rapidamente o calor do solo (ou seja, não chegam ao ponto de esgotar sua capacidade térmica) o que faz com que este seja um material de destaque quando pretende-se instalar um sistema de trocador de calor de pequenas dimensões (ANGNES, 2018).

- **Umidade do solo**

A difusividade térmica é variável conforme o conteúdo de água, o que faz com que os movimentos de umidade exerçam efeitos sobre a transferência de calor dos solos (PURI, 1986). Em um estudo com cabos de alta tensão enterrados, constatou-se que na ocorrência de altas temperaturas, a umidade migra das regiões mais quentes para as regiões mais frias, onde condensam (FERREIRA, 1987).

Musskopf (2006) explica esse fenômeno como sendo devido à atuação de dois processos no solo localizado próximo aos tubos, a saber, o processo de trocas de calor e o de trocas de massa

(água presente no solo). Segundo o autor, a diferença de temperatura entre a área quente dos tubos e as partículas do solo desencadeia o processo de troca de calor, que essa região de temperaturas não-uniformes resultante faz com que ocorra o fluxo de água no interior do material. Esse mecanismo também acarreta trocas de calor e de massa no leito do solo, resultando na redução da umidade e em um aumento da temperatura.

Entretanto, em uma análise dimensional do processo de transferência de calor, utilizando solos com variações de temperaturas de até 10°C por períodos de 24 horas, concluiu-se que os fluxos de umidade não causam um efeito significativo, representando apenas 0,1% das transferências totais de calor entre o solo e os tubos. Este fato faz com que a umidade não seja uma variável relevante nos sistemas de trocadores de calor (GAUTHIER; LACROIX; BERNIER, 1997).

Por meio de simulações matemáticas, Lombardi (2005) confirma os dados apresentados anteriormente, colocando a umidade como um fator irrelevante para o calor armazenado nos solos, podendo ser desconsiderada nos sistemas de ventilação por tubos enterrados.

- **Água de condensação e umidade no interior dos tubos**

Deve-se evitar a umidade no interior dos tubos, pois a mesma pode promover o desenvolvimento e a proliferação de fungos e bactérias, além de acarretarem maus cheiros, no ambiente interno da edificação, o que é extremamente indesejável para a saúde e para o conforto, por questões de habitabilidade.

Uma das fontes de umidade no trocador de calor é a água de condensação, que ocorre quando a umidade do ar (quente) entra em contato com a superfície do tubo (fria), condensando-se na parede do mesmo.

Uma das técnicas utilizadas para evitar o acúmulo de água no interior dos tubos é projeta-los e instalá-los com uma leve inclinação, fazendo a água escoar para um ponto de saída (um dreno ou poço). Quanto a esta consideração de evitar-se o acúmulo de água no interior dos tubos, Angnes (2018) recomenda uma declividade dos dutos do sistema variando entre 1% e 3%.

- **Renovação do ar do ambiente edificado**

Outra consideração importante é a taxa mínima de renovação do ar para que se tenha a higiene adequada e se obtenha as condições necessárias para a boa saúde dos ocupantes do ambiente. Assim, deve-se atender ao disposto pela ANVISA (2003), como comentado no item 3.6.1 deste trabalho.

- **Utilização de água no sistema**

A infiltração de água no sistema de tubos, durante os períodos de verão, afeta levemente as trocas de calor do ar de uma forma positiva, melhorando em torno de 26% o resfriamento do ar por meio da evaporação. Entretanto, deve-se atentar para os problemas de higiene que podem ser acarretados em função do acúmulo de umidade, devendo-se evitar casos de proliferação de larvas, e a criação de fungos e maus cheiros, devido ao fato de poder ocorrer a retenção de água no interior dos tubos (HOLLMULLER; LACHAL, 2001).

4 PROJETO DEMONSTRATIVO

As pesquisas podem ser classificadas como qualitativas ou quantitativas. A essência do método qualitativo consiste na interpretação, ou seja, na aplicação de um conjunto de técnicas objetivando a construção de uma realidade no caso de conjunturas difíceis de se descrever numericamente. No método qualitativo, as informações são reunidas por análise, descrição e gravação. Quando se tem a quantificação das informações, utilizando-se métodos estatísticos, opiniões e dados obtidos por meio de pesquisas, análises numéricas e testes, tem-se a pesquisa quantitativa (FONSECA, 2002).

Portanto, baseado nas informações apresentadas anteriormente, o presente trabalho consiste em uma pesquisa de abordagem quantitativa, pois utiliza-se de dados numéricos, cálculos e análises estatísticas, para desenvolver o equacionamento matemático do dimensionamento de trocadores de calor do tipo solo-ar.

Pode-se também enquadrar este trabalho como uma pesquisa experimental, na qual serão aplicadas e avaliadas diversas variáveis, objetivando fazer o dimensionamento de trocadores de calor que sejam capazes tanto de resfriar quanto de aquecer ambientes residenciais unifamiliares de forma eficiente e com baixo custo.

4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Primeiramente, considere-se o fato deste trabalhar sobre um anteprojeto demonstrativo, cujas plantas de Situação, de Localização e Arquitetônica não se tratam de concepções reais ou de uma residência que tenha sido construída. Dessa forma, podem haver alguns dados de projeto executivo que ainda precisem ser revisados, pois não foram feitos os dimensionamentos estrutural, hidrossanitário e elétrico, nem a análise de interferências. Para que seja possível, efetivamente, construir a edificação residencial que é apresentada neste capítulo, dever-se-ia primeiramente observar essas considerações. Entretanto, para o projeto do Trocador de Calor de que trata este trabalho, são suficientes as informações aqui apresentadas. O relatório de

sondagem aqui utilizado trata-se de um estudo real, feito no terreno indicado no projeto, mas referente a uma outra obra que foi construída no local.

Considere-se também que foi escolhida a configuração em série para o trocador de calor, devido à dificuldade que existe em se ter uma distribuição uniforme das pressões dentro dos tubos na configuração em paralelo. A configuração em série, apesar de apresentar maiores perdas de carga em relação à configuração em paralelo, é uma configuração mais confiável do sistema.

Outra consideração importante é que neste trabalho é avaliado apenas o resfriamento do ar ambiente por meio do Trocador de Calor, não sendo feita a quantificação em relação ao aquecimento do ambiente. Considere-se também a delimitação de ser avaliado apenas o mês mais quente para a refrigeração, e não os doze meses do ano.

4.2 PROJETO ARQUITETÔNICO

A edificação residencial unifamiliar situa-se na cidade de Porto Alegre – RS, no bairro Tristeza, nas coordenadas geográficas (30°06'38.8"S 51°14'50.7"W), tendo a área total do terreno 2.025,00 m². Trata-se de uma casa de dois pavimentos, com uma área total construída de 464,10 m².

O número de pessoas residindo na casa é estimado em função do número de dormitórios, no caso deste projeto, 3 dormitórios, considerando-se uma taxa de 2 pessoas/dormitório, resultando em um total de 6 pessoas.

Quanto às áreas dos ambientes da edificação residencial, o Quadro 1 as apresenta, estando indicadas também a área total e o volume total de ar dos ambientes nos quais deverá ser feito o condicionamento. Foi determinada a realização do projeto nos cômodos internos, excetuando-se garagem, closet, depósito, oficina e reservatório superior.

Quadro 1 – Áreas, volumes e outras informações relacionadas à residência unifamiliar

Pavimento	Cômodo	Área (m ²)	Condição- namento	Área Cond. (m ²)	Pé-direito (m)	Volume Cond. (m ³)
Pavimento Térreo	Varanda 1 (frente)	8,80	Não	274,66	3,00	824,0
	Hall	4,20	Sim			
	Lavabo	3,70	Sim			
	Escritório	12,61	Sim			
	Sala de estar	28,70	Sim			
	Sala de jantar	17,66	Sim			
	Cozinha	22,75	Sim			
	Lavanderia	7,88	Sim			
	Área de circulação 1	3,67	Sim			
	Quarto de Casal	27,86	Sim			
	Área de circulação 2	13,51	Sim			
	Escada	8,19	Sim			
	Despensa	9,95	Sim			
	Quarto de Hóspedes	18,49	Sim			
	Garagem	62,50	Não			
	Closet casal	8,87	Não			
	Banheiro casal	7,56	Sim			
	Varanda 2 (fundos)	12,45	Não			
	Quarto de Solteiro 1	20,06	Sim			
	Banheiro de solteiro	6,06	Sim			
Quarto de solteiro 2	20,06	Sim				
Pavimento Superior	Depósito	10,46	Não			
	Oficina	22,01	Não			
	Reservatório Superior	10,38	Não			
	Estúdio de gravação	15,45	Sim			
	Escada	5,90	Sim			
	Área de circulação 3	6,56	Sim			
	Sala de estudos	13,84	Sim			
Sacada	33,10	Não				

(fonte: de autoria própria)

O Apêndice A apresenta as pranchas do Projeto Arquitetônico, com todas as informações necessárias e relevantes. A Figura 26 apresenta uma vista em perspectiva da fachada da casa, modelo feito no *software SketchUp*.

Figura 26 – Vista em perspectiva da casa



(fonte: de autoria própria)

As demais informações referentes ao projeto arquitetônico estão dispostas nos apêndices e anexos, no final deste trabalho.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO SOLO E DO CLIMA

- **Solo**

As características do solo foram obtidas a partir das informações contidas no Relatório de Sondagem em SPT, o qual pode ser encontrado nos anexos A e B.

Os furos de sondagem SP01, SP02 e SP03 do relatório de sondagem, têm sua locação conforme consta no Anexo A. Observa-se também, que os pontos de sondagem têm grandes semelhanças entre si, em relação às características do solo e ao nível do lençol freático, como pode-se inferir dos boletins de sondagem encontrados no Anexo B. Entretanto, devido ao fato de estar prevista a implantação do trocador de calor nos fundos da residência, muito mais próximo ao furo SP02 do que dos outros dois (como pode-se ver no Apêndice B), serão utilizadas apenas as informações do solo referentes a este furo de sondagem, apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Perfil do solo utilizado

Profundidade (m)	Cota (m)	NSPT	Solo	Designação
0,00	26,90	4	Solo vegetal	Mole
1,00	25,90	7	Argila siltosa com areia fina	Média
2,00	24,90	19	Argila siltosa com areia grossa e pedregulhos	Rija
3,00	23,90	38		Dura
4,00	22,90	≥ 40		Dura
5,00	21,90	≥ 40		Dura
■ Impenetrável: 5,90 m ■ Nível d'água: 1,50 m				

(fonte: de autoria própria)

Assim, considerando-se as informações do Quadro 2, e que a profundidade de enterramento dos tubos do trocador de calor, deve ser superior a 2,00 m, pode-se afirmar que o solo utilizado neste projeto se trata de uma argila siltosa com areia grossa e pedregulhos completamente saturado (o lençol freático encontra-se a apenas 1,50 m de profundidade, mais próximo à superfície do que a profundidade em que os tubos devem ser instalados).

Um dos fatores mais importantes relacionados ao comportamento térmico do solo é a condutividade térmica, que é a habilidade do material (neste caso, o solo) conduzir calor. Solos finos como siltes, argilas, argilas siltosas e siltes argilosos, sob a condição de estarem saturados, têm uma condutividade térmica na faixa dos 0,25 aos 2,5 $W/m \cdot K$, assumindo valores consideravelmente mais baixos quando secos (MITCHELL; SOGA, 2005). Além disso, pode-se assumir uma condutividade térmica para solos pesados saturados de 2,42 $W/m \cdot K$ (condutividade térmica de referência do *software EnergyPlus*, para este tipo de solo), podendo-se utilizá-lo para o dimensionamento de trocadores de calor (LOPES, 2012). Portanto, devido ao fato de o solo utilizado neste trabalho estar enquadrado na classificação de Mitchell e Soga (2005) e por se tratar de um solo pesado e saturado, semelhante ao solo utilizado por Lopes (2012), assumiu-se uma condutividade térmica de 2,42 $W/m \cdot K$.

Como visto na revisão bibliográfica, tanto Farias (2021), quanto Bharadwaj e Bansal (1981), afirmam que a partir de uma profundidade de 4 m não ocorrem variações anuais de temperatura

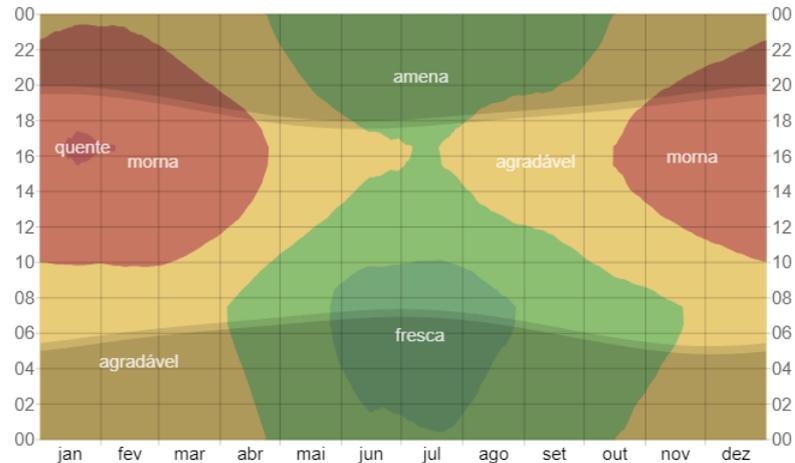
no solo, tendendo a permanecer à temperatura média daquela região. No caso de Porto Alegre, ao longo do ano, a média de temperatura varia de 10 a 30 °C, resultando em uma temperatura média anual de, aproximadamente, 20 °C. Portanto, a temperatura da parede do trocador, que corresponde à temperatura do solo à profundidade de 4 m é $T_{parede(4m)} = T_{solo(4m)} = 20\text{ °C}$. Entretanto, a norma técnica NBR 9061 – Segurança de Escavação a Céu Aberto estabelece que, a uma profundidade maior do que 3,00 m é necessário o uso de patamares, bermas ou plataformas. Uma profundidade de até 3 metros requer apenas que as valas sejam executadas com as paredes em taludes cujo ângulo com a horizontal não exceda 45° em solos não coesivos ou coesivos médios e 60° em solos coesivos resistentes (ABNT, 1985).

Dessarte, para evitar gastos excessivos com escavações, adotou-se uma profundidade de 3 metros. Como visto na revisão bibliográfica, os dados experimentais de Medeiros e Omido (2018) comprovam que a uma profundidade de 3 metros, a variação anual da temperatura do solo é de aproximadamente 1°C. Para efetuar a correção da temperatura do solo (no caso particular do dimensionamento para o resfriamento de ambientes), basta somar a variação da temperatura à temperatura do solo, resultando em $T_{solo\text{corrigida}} = 20 + 1 = 21\text{ °C}$. Assim, para este projeto, será adotada uma profundidade de enterramento dos tubos de 3,00 m e uma temperatura da parede do tubo $T_{tubo} = 21\text{ °C}$.

- **Clima**

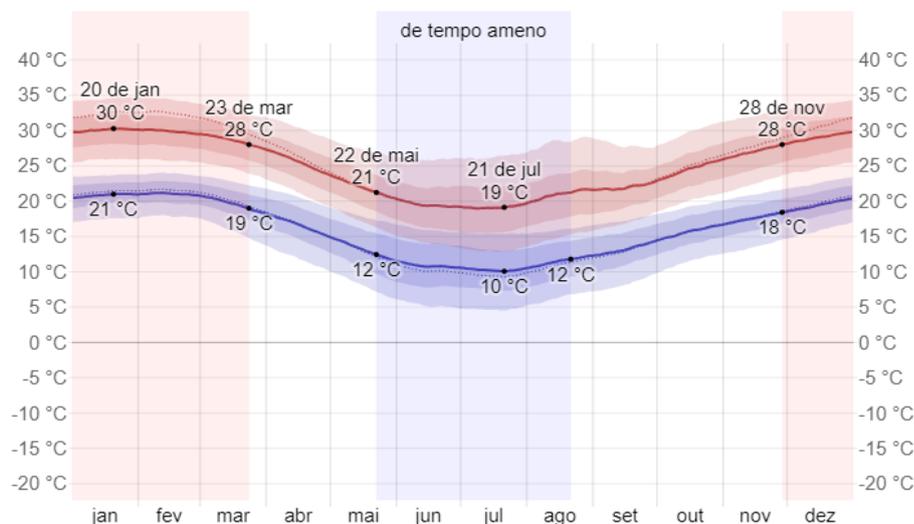
O clima considerado é o da cidade de Porto Alegre – RS. Percebe-se pelo gráfico apresentado na Figura 27 que, nesta região, ocorrem grandes variações diárias de temperatura, o que significa que é uma cidade em que se tem um clima que justifica o uso de sistemas de trocador de calor, como visto na revisão de literatura.

Figura 27 – Temperatura média horária em Porto Alegre

(fonte: DIEBEL *et al.*, 2024)

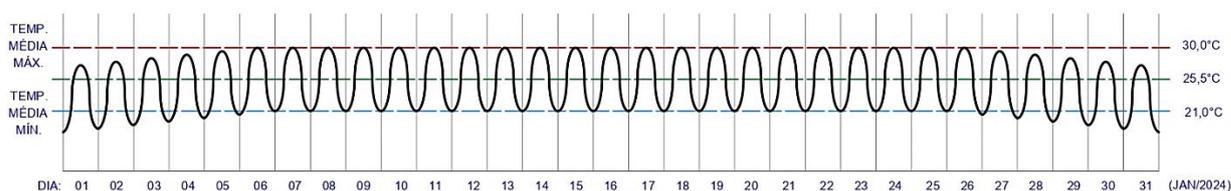
Como comentado anteriormente, neste trabalho será avaliado apenas o resfriamento do ar por meio do trocador de calor. O método utilizado propõe que seja analisado o comportamento das temperaturas médias do mês mais quente, de onde pode ser obtido o valor para o ar de entrada do sistema. O gráfico da Figura 28 apresenta as temperaturas médias para a cidade de Porto Alegre, em que a linha vermelha apresenta as temperaturas médias máximas e a linha azul, as médias mínimas. Observe-se que a temperatura média mínima do mês mais quente (janeiro) é igual a 21°C e a temperatura média máxima é igual a 30°C.

Figura 28 – Temperaturas máximas e mínimas médias em Porto Alegre

(fonte: DIEBEL *et al.*, 2024)

Para determinar a temperatura do ar na entrada no trocador de calor, deve-se, primeiramente, compreender a variação da temperatura ao longo do dia, a qual pode ser observada na Figura 27. Essa variação pode ser representada no formato senoidal. Da mesma forma como em uma senoide acontecem variações tanto negativas quanto positivas de mesma amplitude, assim, pode-se fazer uma aproximação (com uma boa precisão) da variação da temperatura ao longo do dia assumindo valores de mesma amplitude em relação à temperatura média do mês observado. A Figura 29 apresenta um desenho esquemática desta representação no formato senoidal, da variação diária das temperaturas para o mês mais quente do ano.

Figura 29 – Representação senoidal da variação das temperaturas diárias do mês de janeiro em Porto Alegre



(fonte: de autoria própria)

Observa-se que, nesta representação, ocorre simetria horária das temperaturas mínimas e máximas diárias. É claro que o comportamento real da temperatura do dia não é exatamente igual ao da representação senoidal, pois existe variabilidade decorrente da insolação, mas essa representação apresenta uma boa precisão em termos de valores médios de temperatura, além de ser uma forma simplificada para a compreensão do problema. Outro fato importante é que, assim como ocorre simetria de amplitudes negativas e positivas na senoide, o mesmo é observado nas variações diárias reais de temperatura.

No formato senoidal deve-se dividir os 360° de um ciclo pelas 24 horas do dia. Assim, obtém-se uma variação horária na senoide de $360^\circ \div 24h = 15^\circ$. Iniciando a contagem às 10h da manhã, considerando o formato apresentado, por simplificação, as horas mais quente e mais fria do dia são, respectivamente $n = 6$ e $n = 18$ (16h e 4h). Dessa forma, o amanhecer compreende à faixa $19 \leq n \leq 20$ e o anoitecer à faixa $9 \leq n \leq 10$ para o mês de janeiro, pois ocorrem variações da hora do nascer e do pôr do sol ao longo do ano. Equacionando-se na forma senoidal, usando-se as equações abaixo, tem-se os resultados apresentados na Tabela 4.

$$T_{méd} = \frac{21 + 30}{2} = 25,5^{\circ}C \quad \text{Equação 17}$$

$$Y = \textit{amplitude} = \frac{30 - 21}{2} = 4,5^{\circ}C \quad \text{Equação 18}$$

$$T_{hora\ do\ dia} = T_{méd} + Y \times \textit{sen}\left(\frac{n}{24} \times 15^{\circ}\right) \quad \text{Equação 19}$$

Tabela 4 – Valores de temperatura obtidos pelo formato senoidal

Decorrer do dia										Pôr do sol		
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T(°C)	25,5	26,7	27,8	28,7	29,4	29,8	30,0	29,8	29,4	28,7	27,8	26,7
Decorrer da noite						Nascer do sol						
n	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
T(°C)	25,5	24,3	23,3	22,3	21,6	21,2	21,0	21,2	21,6	22,3	23,3	24,3
Média aritmética das temperaturas:										25,5 °C		

(fonte: de autoria própria)

Por fim, a temperatura representativa do mês mais quente do ano na região pode ser aproximada por apenas um ponto, o qual é a média entre as temperaturas ao longo do dia, podendo-se igualá-la à temperatura do ar de entrada do sistema. Portanto, a temperatura de ar na entrada do trocador de calor é $T_{ar,e} = 25,5^{\circ}C$.

4.4 DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR

Primeiramente, para este projeto de trocador de calor, busca-se a máxima vazão mássica de ar em regime permanente, respeitando-se as recomendações encontradas na literatura. A escolha da vazão máxima possível dá-se devido ao fato de implicar maiores trocas de calor, otimizando o uso do solo como reservatório térmico, além de proporcionar uma renovação mais eficiente do ar interno da edificação, o que é altamente desejável.

Como visto na revisão bibliográfica, Gauthier *et al.* (1997) e Lombardi (2005) recomendam uma velocidade máxima de escoamento de 4 m/s (para um trocador com diâmetro de 0,1 m) o que implica uma vazão mássica $\dot{m}_{ar} = 4 \frac{m}{s} \cdot 1,23 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} m^2 = 0,0386 kg/s$.

Entretanto, a taxa de renovação do ar adequada de ambientes climatizados deve ser de, no mínimo, 27 m³/hora/pessoa para ambientes de baixa rotatividade (ANVISA, 2003). Calculando-se a vazão mássica em função da taxa de renovação de 27 m³/hora/pessoa, tem-se o valor $\dot{m}_{ar} = 27 \frac{m^3}{h \cdot pessoa} \cdot 6 pessoas \cdot 1,23 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1 h}{3600 s} = 0,05535 kg/s$.

Assim, define-se a vazão mássica como o maior entre os dois valores calculados, ou seja, $\dot{m}_{ar} = 0,05535 kg/s$, mas restringindo-se a velocidade do ar ao valor máximo recomendado pelos autores citados anteriormente; portanto, calculam-se todos os valores com a referida vazão mássica (0,05535 kg/s), descartando-se os casos em que a velocidade for maior do que 4 m/s.

A temperatura de saída deve ser definida respeitando-se os limites para o conforto humano apresentados por Lamberts, Dutra e Pereira (2014), ou seja, uma temperatura entre 18 e 29°C. Para este trabalho foi arbitrada uma temperatura de saída $T_{ar,s} = 22 °C$.

Na sequência, deve-se arbitrar valores para o diâmetro dos tubos do trocador de calor. Optou-se pelo uso de tubos metálicos, pelo fato de ser o material que apresenta a maior disponibilidade de diferentes diâmetros comerciais existentes, além de ser um material que apresenta uma ótima resistência e durabilidade e de ter uma boa condutividade térmica. Assim sendo, na consideração dos diâmetros, foi adotada a série comercial padrão para tubos metálicos do tipo *Schedule*, com os valores de diâmetros nominais existentes variando entre 4” (0,10 m) e 12” (0,30 m). A Tabela 5 apresenta os valores comerciais existentes para a série padrão (*standard*) de tubos do tipo *Schedule*.

Tabela 5 – Dados técnicos dos tubos metálicos tipo *Schedule* da série Normal

Ø Nominal (polegada)	Ø Externo (mm)	Parede (mm)	Ø Interno (mm)	Peso (kg/m)	$A_{seção\ transv.int.}$ (m²)
4''	114,30	6,02	102,26	16,06	0,00821
5''	141,30	6,55	128,20	21,75	0,01291
6''	168,28	6,35	155,58	25,33	0,01901
8''	219,08	8,18	202,72	42,48	0,03228
10''	273,05	9,27	254,51	60,23	0,05087
12''	323,85	9,52	304,81	73,75	0,07297

(fonte: adaptado de NUNES, 2012)

Arbitrados valores para o diâmetro, calcula-se a eficácia, utilizando-se a Equação 5 e o valor de NTU, por meio da Equação 17, a qual pode ser obtida a partir da Equação 8, isolando-se NTU, como apresentado abaixo:

$$NTU = -\ln(1 - \varepsilon) \quad \text{Equação 20}$$

Os valores da eficácia e de NTU são constantes, devido ao fato de serem calculados em função de $T_{ar,e}$, $T_{ar,s}$ e T_{tubo} , que são parâmetros constantes. Portanto, pode-se classificá-los como dados de entrada do problema.

Prosseguindo com o dimensionamento, explicitando-se a área A na Equação 7, obtém-se a Equação 18. O valor de h é obtido através da Equação 10, a qual pode ser calculada com o auxílio das equações 11b e 11c, respeitando-se as restrições 11a e 11d.

$$A = \frac{NTU \cdot \dot{m}_{ar} \cdot cp_{ar}}{h} \quad \text{Equação 21}$$

Quanto aos parâmetros quantitativos referentes às características do ar, assumindo-se valores constantes nos livros e tabelas encontrados na literatura, tem-se que: o calor específico do ar tem o valor aproximado de $cp_{ar} = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; a massa específica do ar tem um valor $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$; a viscosidade cinemática do ar assume o valor $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; para o número de Prandtl assume-se um valor de $Pr = 0,70$; e a condutividade térmica do ar é $\lambda = 0,026 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

O próximo passo é calcular o comprimento L , o que pode ser feito por meio da Equação 9, reescrevendo-a na forma explícita para a variável L , resultando na Equação 22, apresentada logo abaixo:

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D} \quad \text{Equação 22}$$

Na sequência, calcula-se a perda de carga distribuída nos tubos e as perdas de carga localizadas, o que pode ser feito por meio das equações 14 e 15. A perda de carga total é dada pela soma entre o total de perdas de carga distribuídas (Δp) e o somatório das perdas de carga localizadas ($\sum \Delta P_L$), conforme a Equação 23:

$$\Delta P = \Delta p + \sum \Delta P_L \quad \text{Equação 23}$$

Por fim, deve-se calcular também a potência hidráulica, por meio da Equação 16, a qual é utilizada no dimensionamento do insuflador de ar. A vazão volumétrica é dada pela razão entre a vazão mássica e a massa específica do ar, conforme a Equação 24:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho} \quad \text{Equação 24}$$

O equacionamento de dimensionamento pode ser feito por meio de planilhas eletrônicas, utilizando-se o *software Excel* (como é o caso deste trabalho). O resumo dos parâmetros de entrada é apresentado na Tabela 6:

Tabela 6 – Parâmetros de entrada para o dimensionamento

Dados de entrada do problema	Valor
Vazão mássica de ar	0,05535 kg/s
Temperatura do ar de entrada	25,5 °C
Temperatura do ar de saída do trocador	22 °C
Temperatura da parede do trocador	21 °C
Calor específico do ar	1000 J/kg.K
Massa específica do ar	1,23 kg/m ³
Viscosidade cinemática do ar	0,000015 m ² /s
Número de Prandtl (Pr) do ar	0,70 (adim.)

Condutividade térmica do ar	0,026 W/m.K
Eficácia (ϵ)	77,8 %
NTU	1,504 (adim.)

(fonte: de autoria própria)

O resultado dos cálculos é apresentado na Tabela 7, obtidos em planilha eletrônica utilizada para o dimensionamento do trocador de calor.

Tabela 7 – Dados de saída de dimensionamento do trocador de calor solo-ar

Dimensionamento do Trocador de Calor – Configuração em Série											
D (m)	V_{ar} (m/s)	Re (adim.)	ξ (adim.)	Nu (adim.)	h (adim.)	Área (m ²)	L (m)	Δp (Pa)	ΔP_L (Pa)	ΔP (Pa)	P_h (W)
0,102	5,48	37.353	0,0224	83,06	21,12	3,94	12,27	49,62	60,93	110,55	4,97
0,128	3,49	29.795	0,0236	69,78	14,15	5,88	14,61	20,14	24,67	44,80	2,02
0,156	2,37	24.551	0,0248	60,10	10,04	8,29	16,96	9,32	11,37	20,69	0,931
0,203	1,39	18.842	0,0265	48,98	6,282	13,25	20,81	3,25	3,95	7,20	0,324
0,255	0,88	15.008	0,0281	41,04	4,192	19,86	24,84	1,321	1,588	2,91	0,1309
0,305	0,62	12.531	0,0295	35,62	3,039	27,40	28,61	0,648	0,772	1,420	0,0639

(fonte: de autoria própria)

Percebe-se a célula destacada em vermelho na Tabela 7, na qual está contido o valor de velocidade do ar de 5,48 m/s, para um tubo de 0,102 m de diâmetro interno. Este valor de diâmetro não é adequado, pois resulta em uma velocidade superior a 4 m/s, que é a velocidade máxima recomendada, comentada anteriormente. Portanto, esse valor de diâmetro deve ser descartado.

Busca-se, no dimensionamento, o menor custo possível, mantendo-se o bom funcionamento do sistema. Os custos podem ser reduzidos, reduzindo-se o consumo de material. Neste interim, aparentemente, a melhor opção é a utilização de tubos com diâmetro $D = 0,128 m$, os quais implicam o menor comprimento de tubo e o menor peso (kg/m). Entretanto, se por um lado tubos mais finos são mais baratos e implicam comprimentos menores, deve-se considerar também os gastos de energia elétrica decorrentes das maiores perdas de carga que ocorrem, ou seja, a potência hidráulica (P_h) pode impactar nos custos de energia elétrica e no custo de compra do insuflador.

Insufladores normalmente são classificados e comercializados em função da vazão volumétrica que movimentam. O insuflador deste projeto deve ter uma vazão $Q = 27 \frac{m^3}{h \cdot pessoa}$. $6 \text{ pessoas} = 162 m^3/h$. Dessa forma, as perdas de carga consideradas neste projeto não impactam o custo de compra do insuflador. No entanto, será avaliado o custo energético adicional decorrente das perdas de carga.

Buscando-se nos catálogos de fabricantes os modelos disponíveis no mercado, tem-se que para uma vazão de $160 m^3/h$ (vazão comercial mais próxima à vazão calculada de $162 m^3/h$), a potência total absorvida de $26 W$, para redes de $127 V$ (como é o caso de Porto Alegre) (BERTOMEU *et al.*, 2023).

Para que se possa avaliar o acréscimo de gasto energético, deve-se calcular a potência elétrica, em função da potência hidráulica, do motor a ser utilizado. A potência do motor elétrico, Pe é calculada pela expressão $Pe = Ph/n$, onde Ph é a potência hidráulica e n , o rendimento. Arbitrando-se um rendimento de 85% , tem-se que $Pe = Ph/0,85 = 1,176 \cdot Ph$.

No caso do menor diâmetro de tubo que pode ser utilizado no dimensionamento ($D = 0,128 m$), tem-se uma potência hidráulica de $2,02 W$, que implica uma potência elétrica $Pe = 2,02 \cdot 1,176 = 2,38 W$, o que equivale a um aumento de aproximadamente $9,1 \%$ na potência total absorvida pelo motor. Assim, considerando-se um custo de $R\$ 0,50/kWh$, calculando-se a potência elétrica do motor do insuflador, o consumo elétrico e o custo elétrico, tem-se o seguinte:

$$P_{eTotal} = 26 W + 2,38 W = 28,38 W = 0,02838 kW \quad \text{Equação 25}$$

$$Consumo_{elétrico} = 0,02838 kW * 24 \frac{h}{dia} * 30 \frac{dia}{mês} = 20,43 \frac{kWh}{mês} \quad \text{Equação 26}$$

$$Custo_{elétrico} = 20,43 \frac{kWh}{mês} * 0,50 \frac{R\$}{kWh} = 10,21 \frac{R\$}{mês} \quad \text{Equação 27}$$

Aumentando-se o diâmetro para o valor comercial mais próximo existente ($D = 0,156 m$), tem-se uma potência hidráulica de $0,931 W$, o que implica uma potência elétrica $Pe = 0,931 \cdot$

1,176 = 1,095 W, o que equivale a um aumento de aproximadamente 4,2 % na potência total absorvida pelo motor. Para este segundo caso, considerando-se um custo de R\$ 0,50/kWh, calculando-se a potência elétrica do motor do insuflador, o consumo elétrico e o custo elétrico, tem-se o seguinte:

$$P_{eTotal} = 26 W + 1,095 W = 27,095 W = 0,027095 kW \quad \text{Equação 28}$$

$$Consumo_{elétrico} = 0,027095 kW * 24 \frac{h}{dia} * 30 \frac{dia}{mês} = 19,51 \frac{kWh}{mês} \quad \text{Equação 29}$$

$$Custo_{elétrico} = 19,51 \frac{kWh}{mês} * 0,50 \frac{R\$}{kWh} = 9,75 \frac{R\$}{mês} \quad \text{Equação 30}$$

Nota-se que ocorre uma diferença de R\$ 0,46 por mês (R\$ 5,52 por ano) em relação ao caso do diâmetro imediatamente inferior. Em contrapartida, ocorre um acréscimo de material de $16,96 m \cdot 25,33 \frac{kg}{m} - 14,61 m \cdot 21,75 \frac{kg}{m} = 112 kg$ de metalon (ou aço). Considerando-se o preço atual do aço de 5,50 reais/kg, tem-se um aumento no custo de material de aproximadamente R\$ 615,06 (nesse caso, seriam necessários mais de 100 anos de economia de energia para recuperar o investimento).

Aumentando-se o diâmetro para o valor comercial mais próximo existente ($D = 0,203 m$), tem-se uma potência hidráulica de 0,324 W, o que implica uma potência elétrica $Pe = 0,324 \cdot 1,176 = 0,381 W$, o que equivale a um aumento de aproximadamente 1,5 % na potência total absorvida pelo motor. Para este terceiro caso, considerando-se um custo de R\$ 0,50/kWh, calculando-se a potência elétrica do motor do insuflador, o consumo elétrico e o custo elétrico, tem-se o seguinte:

$$P_{eTotal} = 26 W + 0,381 W = 26,381 W = 0,026381 kW \quad \text{Equação 31}$$

$$Consumo_{elétrico} = 0,02638 kW * 24 \frac{h}{dia} * 30 \frac{dia}{mês} = 18,99 \frac{kWh}{mês} \quad \text{Equação 32}$$

$$Custo_{elétrico} = 18,99 \frac{kWh}{mês} * 0,50 \frac{R\$}{kWh} = 9,50 \frac{R\$}{mês} \quad \text{Equação 33}$$

Nota-se que ocorre uma diferença de R\$ 0,25 por mês (R\$ 3,00 por ano) em relação ao caso do diâmetro imediatamente inferior. Em contrapartida, ocorre um acréscimo de material de $20,81 m \cdot 42,48 \frac{kg}{m} - 16,96 m \cdot 25,33 \frac{kg}{m} = 454 kg$ de metalon (ou aço). Considerando-se o preço atual do aço de 5,50 reais/kg, tem-se um aumento no custo de material de aproximadamente R\$ 2.499,27. Nesse caso seriam necessários muito mais do que 100 anos de economia de energia para recuperar o investimento.

Portanto, conclui-se que o investimento adicional para se ter diâmetros maiores com a finalidade de economizar com energia elétrica não é justificável, sendo mais vantajoso serem adotados tubos de diâmetro $D = 0,128 m$, o que resulta em um valor de comprimento total dos tubos $L = 14,61 m$ (adota-se o valor de 15 m).

Por fim, calculando-se o ganho de energia, ou seja, quanta energia o sistema consegue recuperar, deve-se primeiramente calcular o valor de \dot{Q} , por meio da Equação 2, obtendo-se:

$$\dot{Q} = 0,05535 \times 1000 \times (22 - 25,5) = -193,7 J/s = -0,1937 kW \quad \text{Equação 34}$$

O sinal negativo significa que o calor é retirado do ar (resfriamento do ar). Convertendo-se o valor calculado para quilowatt-hora (kWh), tem-se um ganho diário de energia de:

$$\dot{Q} = \left| -0,1937 kW \times 24 \frac{h}{dia} \right| = 4,65 \frac{kWh}{dia} \quad \text{Equação 35}$$

Calculando-se para as os 30 dias do mês mais quente, tem-se o ganho mensal de energia:

$$\dot{Q} = 4,65 \frac{kWh}{dia} \times 30 \frac{dias}{mês} = 139,5 \frac{kWh}{mês} \quad \text{Equação 36}$$

4.5 OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Devem ser observadas ainda outras considerações. Primeiramente, a localização do trocador de calor é abaixo da quadra esportiva, a uma profundidade de 3,00 metros, sobre a qual deve ser

plantada grama (observe-se a localização no Apêndice A). Quanto à fase de implantação, primeiramente deve ser feita a escavação da área necessária à profundidade de enterramento para posterior colocação dos tubos do trocador, para então fazer o reaterro, utilizando-se o mesmo solo que for retirado do local. Por fim, deve ser feito o nivelamento de toda a área da quadra esportiva, por meio de obras de terraplenagem.

Perceba-se que o Apêndice B apresenta a topografia do terreno, com as linhas de divisa e a delimitação da residência unifamiliar. Pela planta de topografia pode-se perceber que o terreno é moderadamente inclinado, com um desnível de aproximadamente um metro desde o fundo da casa até a divisa entre lotes (comparar a planta de situação do Apêndice A à planta de topografia do Apêndice B). Entretanto, como comentado anteriormente, estão previstas obras de terraplenagem para o nivelamento do terreno, sobretudo na área da quadra esportiva, a qual deve ser construída nos fundos da casa (Apêndice A). O Trocador de Calor deve ser construído abaixo da quadra esportiva, a qual deve ter um revestimento de grama e cujas dimensões são $9,00 \times 18,00 \text{ m}$, com um afastamento de $5,00 \text{ m}$ das paredes da casa. Por esse motivo, para o projeto do trocador de calor, foram desconsiderados os efeitos da topografia do terreno, assumindo-se um terreno plano, com o nível estabelecido como sendo o mesmo que o da residência unifamiliar.

A entrada de ar do sistema deve ter um filtro, como o apresentado na Figura 30, cuja função é evitar a entrada de insetos, sujeira e água no interior dos tubos. A localização da entrada de ar não pode ser na área destinada à quadra esportiva, para não comprometer a utilização da mesma. Neste projeto optou-se por colocar a entrada de ar do sistema próxima ao muro de divisa do terreno, de modo a não atrapalhar os espaços destinados a outros fins. Junto à saída de ar do trocador de calor, dentro da casa, deve ser instalado o insuflador de $160 \text{ m}^3/\text{h}$. Neste projeto não foi feito o dimensionamento e o detalhamento da distribuição do duto de entrada para cada um dos cômodos da residência, sendo esta, inclusive, uma sugestão para trabalhos futuros. Em relação ao trecho de saída do sistema, representado no projeto executivo, o Apêndice C limita-se apenas a mostrar que devem estar inclusos o insuflador e o filtro junto à saída de cada uma das extremidades de saída dos dutos.

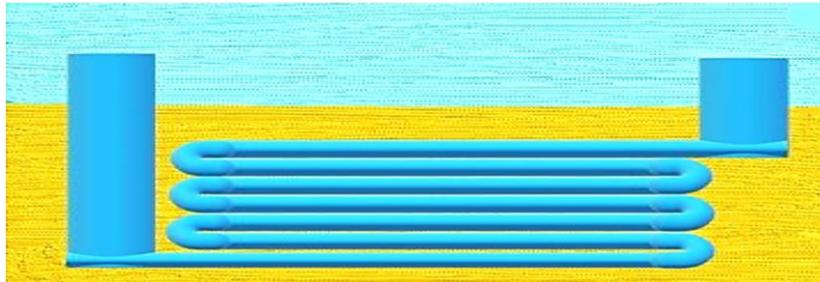
Figura 30 – Filtro de entrada do trocador de calor



(fonte: SANTANA; RIBEIRO, 2019)

Outra consideração que deve ser feita é a configuração escolhida para o sistema, que é do tipo tubulação disposta em série. Na Figura 31 pode-se ver um esboço da tubulação do trocador de calor na configuração em série, com todas as conexões necessárias para garantir a movimentação do ar ao longo de todo o comprimento dos tubos. Nota-se que são utilizadas curvas longas e não joelhos, o que ajuda a reduzir as perdas de carga. Nota-se também que, aparentemente, poderiam ter sido evitadas todas estas curvas, utilizando-se uma área maior do terreno disponível, entretanto, os custos adicionais de escavação não justificam as economias de energia elétrica em função das menores perdas de carga (considerando-se não apenas a escavação linear do tubo, mas também os taludes de inclinação mínima que a NBR 9061 (ABNT, 1985) estabelece, o que, neste caso, torna a escavação de uma área retangular mais vantajosa do que a escavação de uma vala contínua). A redução dos gastos com escavações é a justificativa de utilizar-se as 6 curvas no sistema em série, conforme o desenho esquemático da Figura 31.

Figura 31 – Desenho esquemático da tubulação na configuração em série

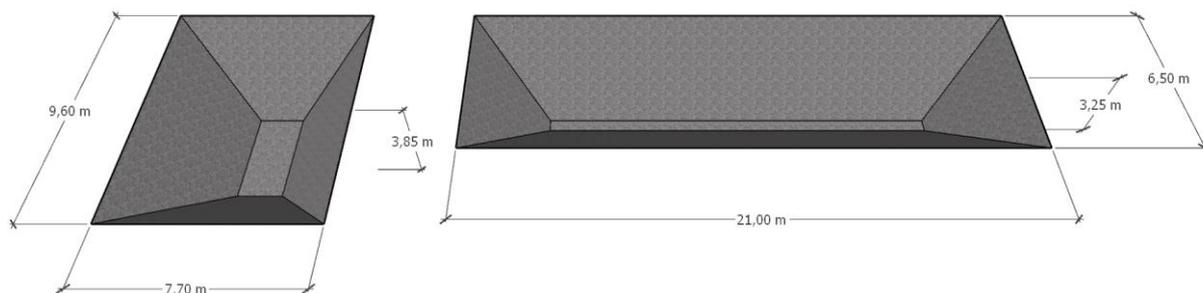


(fonte: Farias, 2021)

Outra consideração importante é o espaçamento mínimo entre dutos. Como visto na revisão de literatura, por meio dos gráficos apresentados por Hollmuller *et al.* (2006), pode-se inferir que o afastamento mínimo entre tubos, para que ocorra um bom funcionamento do sistema tanto para resfriamento quanto para aquecimento do ar, deve ser de aproximadamente 4 vezes o diâmetro do tubo. Dessa maneira, considerando-se o diâmetro externo de 0,141 m (referente ao diâmetro interno definido de 0,128 m), tem-se um espaçamento mínimo de 0,564 m. Portanto, para este projeto, adota-se o espaçamento de 0,60 m.

Para a comprovação de que ocorre a redução dos gastos com escavações, utilizando-se o sistema em série em relação a um tubo isolado e contínuo, são feitas as seguintes considerações: primeiramente, neste trabalho, são considerados taludes de 45°; as dimensões da base da vala para o sistema em série são obtidas a partir da disposição dos tubos, ou seja, tem-se a equação $6 \times a + 7 \times b = 15 \text{ m}$, em que a é espaçamento entre os trechos de tubo ($a = 0,60 \text{ m}$) e b é o comprimento de cada trecho de tubo, tendo um valor calculado $b = 1,63 \text{ m}$ (adota-se o valor $b = 1,70 \text{ m}$); no caso da vala para um tubo isolado, tem-se as dimensões da base sendo o comprimento a igual ao comprimento total do tubo ($a = 15 \text{ m}$) e para a largura b , adota-se o menor valor possível, ou seja, um valor de 0,50 m, que é a largura aproximada de uma concha de retroescavadeira ($b = 0,5 \text{ m}$). A Figura 32 apresenta um modelo representativo da escavação retangular para implantação do sistema em série (à esquerda) e da vala para um tubo isolado (à direita), utilizando-se as dimensões calculadas para o trocador de calor deste trabalho. A profundidade até a base de cada vala é a profundidade de enterramento do tubo, ou seja, 3,00 m (a profundidade indicada na figura é altura das projeções das pirâmides/prismas).

Figura 32 – Escavação para sistema em série (esquerda) e vala para tubo isolado (direita)



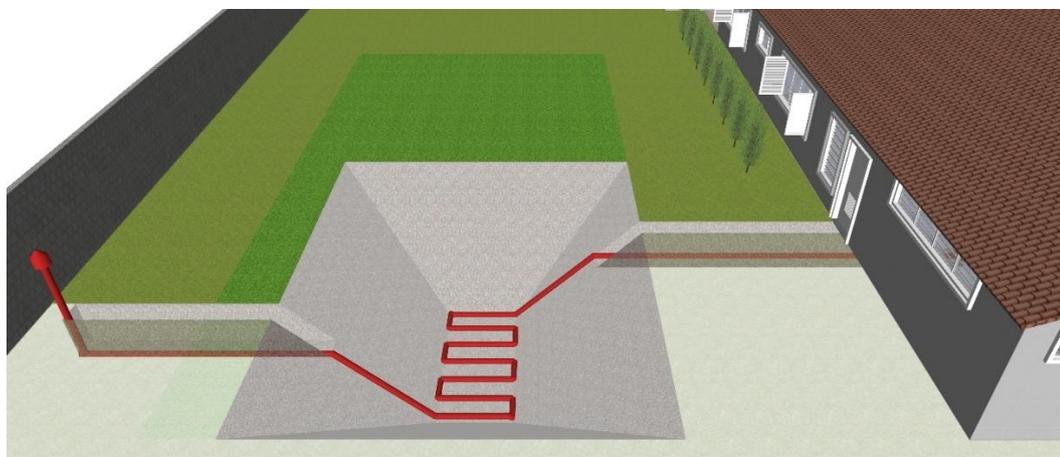
(fonte: de autoria própria)

Calculando-se o volume das valas para os dois casos, tem-se que o material a ser escavado na disposição dos tubos em série é de, aproximadamente, 103 m^3 , e o volume a ser escavado para a execução de um tubo isolado é de, aproximadamente, 198 m^3 (ou seja, uma diferença de aproximadamente 95 m^3 de escavações entre as duas configurações). Dessa forma, conclui-se que é mais vantajoso, do ponto de vista das escavações, utilizar o sistema com a configuração em série, configuração escolhida para este trocador de calor.

Os tubos que ligam a entrada de ar do sistema aos tubos enterrados e destes à entrada de ar na residência podem ser enterrados a uma profundidade menor (de apenas 1 metro ou até menos) de forma a dispensar a necessidade de taludes para a escavação das valas e, assim, reduzir gastos com as escavações. Neste trabalho estes tubos são dispostos à profundidade de 1,00 m, para evitar que ocorram interferências com as vigas baldrame da edificação.

A Figura 33 mostra uma representação das escavações e da disposição dos tubos do sistema de trocador de calor. Nota-se o destaque em verde mais escuro, a qual corresponde à área da quadra esportiva. Os tubos do trocador de calor estão representados na cor vermelha (não sendo a cor real dos tubos, mas apenas para destaca-los melhor na representação).

Figura 33 – Vista em perspectiva do trocador de calor com representação da vala a ser aberta



(fonte: de autoria própria)

Quanto aos materiais constituintes dos tubos, deve-se optar, preferencialmente, por galvanizados ou patinados, por serem mais resistentes à ferrugem e à corrosão, especialmente no caso do aço; já o metalon tem uma maior resistência à corrosão em relação ao aço. O material especificado neste projeto é o aço galvanizado, devido à maior disponibilidade de mercado em relação ao metalon e ao aço patinado, na região de implantação do sistema.

Deve-se respeitar uma inclinação de 1% a 2% nos tubos disposto na horizontal, para que não ocorra o acúmulo de água de condensação nos tubos. Deve ser instalado um poço de água de condensação, cuja localização e cujo detalhamento estão representados no Apêndice C (nele também consta o sentido de inclinação dos tubos). O poço deve ser construído em concreto com hidrofugante, devendo-se garantir também a estanqueidade das ligações dos tubos a ele, para que não ocorra a inundação do sistema, por estar abaixo no nível d'água. A única função do poço é criar um ambiente agressivo à formação de fungos, bactérias e larvas, para evitar maus cheiros e esporos, portanto, coloca-se uma camada de brita misturada com sal em seu interior, para evitar o empocamento de água e a procriação destes microrganismos. Devido ao movimento ininterrupto do ar nos tubos, nas horas de menor umidade relativa do ar, a água evapora, devolvendo o sal ao sistema.

Outros detalhes construtivos e informações podem ser encontrados no projeto executivo do Trocador de Calor Solo-Ar, Apêndice C.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mais uma vez, ressalta-se a importância que os engenheiros civis e arquitetos brasileiros têm na elaboração de projetos que tornem as edificações energeticamente mais eficientes, frente à problemática da demanda crescente de energia elétrica no país, bem como possam garantir conforto e habitabilidade para os usuários. Os aparelhos de ar condicionado são o terceiro maior responsável pelo consumo total de eletricidade nas residências, e o primeiro nas edificações comerciais, evidenciando-se a importância da eficiência térmica em edificações. Portanto, a instalação de trocadores de calor geotérmico é uma forma mais sustentável de se obter o conforto térmico.

Neste trabalho foram abordados com maior ênfase os Trocadores de Calor do tipo Solo-Ar, que se utilizam da inércia térmica do solo, e na configuração aberta, por serem os mais utilizados nas edificações em geral, devido à maior disponibilidade e à possibilidade tanto de aquecimento quanto de resfriamento do ambiente, além de permitirem a renovação do ar interno à residência.

Porto Alegre é uma das cidades brasileiras que têm uma elevada amplitude térmica anual e diária, sendo assim um local adequado para a instalação de sistemas de Trocador de Calor que se utilizam da inércia térmica do solo. Esse fato endossa a assertividade da escolha de um projeto localizado sobre um lote (terreno) nesta cidade.

Para o projeto, foi utilizada a metodologia de Farias (2021), que consiste em um equacionamento para o dimensionamento, possuindo também um caráter experimental, tendo sido o método escolhido, por ser mais simples, possibilitando calcular os parâmetros geométricos (diâmetro, comprimento dos dutos *etc.*) a partir dos parâmetros de dimensionamento (vazão mássica do ar, temperatura de entrada do ar *etc.*). Além disso, os dados de entrada do problema são parâmetros que podem ser obtidos facilmente, descomplicando-se assim o processo de dimensionamento do trocador de calor.

O Projeto Demonstrativo teve como base um Projeto Arquitetônico fictício de uma casa de dois pavimentos, tendo uma área construída total de aproximadamente 464 m² e com um número

estimado de 6 pessoas residindo-a, da qual 274,7 m² de ambiente interno devem ser condicionados; e o solo do terreno, trata-se de uma argila siltosa com areia grossa e pedregulhos completamente saturado. Os cálculos de dimensionamento apontam que seriam necessários 15 metros de tubos metálicos de diâmetro interno $D = 0,128\text{ m}$, para que a temperatura do ambiente da edificação seja mantida, durante o mês mais quente do ano, à temperatura de 22°C (valor contemplado na faixa de conforto térmico humano).

Por questões de extensão do trabalho, não foram realizados os cálculos para todos os doze meses do ano, fazendo-se o dimensionamento e a quantificação da energia recuperada pelo sistema apenas para o mês mais quente.

Os cálculos também apontam uma economia de até 139,5 kWh durante o mês analisado, no qual a energia recuperada pelo sistema tende a ter o maior valor durante o ano, por meio da retirada de calor do ar do ambiente, ou seja, da refrigeração.

Embora não entreguem muita energia (o que é uma limitação do sistema) os trocadores de calor desse tipo têm a capacidade de funcionar ininterruptamente sem acarretar grandes gastos de energia elétrica. Considerando-se os elevados gastos atualmente gerados na refrigeração do ar, tais sistemas ajudam a reduzir o consumo de eletricidade, pois podem ser usados em conjunto com os aparelhos de ar condicionado. Em alguns casos, podem, inclusive, substituir os condicionadores de ar convencionais nas residências. Tudo o que esse tipo de sistema agrega ao condicionamento de ar residencial é economia, e economia é sempre desejável.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se calcular o gasto de energia do motor do insuflador, e o gasto da energia elétrica de aparelhos de ar condicionado convencionais, comparando os valores obtidos, e também calcular o custo de implantação/execução do sistema.

Por fim, a Revisão Bibliográfica e o Projeto Demonstrativo apresentados neste trabalho cumprem o objetivo principal proposto, que é demonstrar a viabilidade técnica do aproveitamento da inércia térmica do solo por meio de um Trocador de Calor do tipo Solo-Ar para o conforto higrotérmico em edificações residenciais unifamiliares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9061**: Segurança de Escavação a Céu Aberto. Rio de Janeiro, 1985.

ANGNES, B. I. **Análise e Revisão da Literatura sobre os Trocadores de Calor Geotérmico, suas Aplicações e Estudos de Caso**. 2018. 62 p. Monografia (Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução-RE Nº 09, de 16 de Janeiro de 2003**. Brasília, 2003.

ASCIONE, F.; BELLIA, L.; MINICHIELLO, F. Earth-to-air Heat Exchangers for Italian Climates. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2177–2188, 1 ago. 2011.

BERTOMEU, E. *et al.* **Sicflux Brasil – Soluções em renovação de ar**. 6 fev. 2023. Disponível em: <<https://sicflux.com.br/>>. Acesso em: 14 jan. 2024.

BHARADWAJ, S. S.; BANSAL, N. K. Temperature Distribution Inside Ground for Various Surface Conditions. **Building and Environment**, v. 16, n. 3, p. 183–192, 1 jan. 1981.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2023: Ano Base 2022**. 30 jan. 2024. Disponível em: <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

D'ANGELIS, W. R.; VEIGA, J. **Arqueologia e Populações Indígenas**. Chapecó: Centro de Memória do Oeste de Santa Catarina, 2014.

DIEBEL, J. *et al.* **Clima, Condições Meteorológicas e Temperatura Média por Mês de Porto Alegre (Brasil) – Weather Spark**. 4 jan. 2024. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/29679/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Porto-Alegre-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 4 jan. 2024.

FARIAS, W. S. **Estudo de um Trocador de Calor Solo-Ar para Resfriamento de Ambientes**. 2021. 39 p. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FERREIRA, L. S. D. **Migração de Umidade Causada por Gradientes Térmicos entre Duas Fronteiras Impermeáveis Contendo Um Meio Poroso Não Saturado**. 1987. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FONSECA, J. J. S. DA. **Apostila de Metodologia da Pesquisa Científica**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2002.

GAUTHIER, C.; LACROIX, M.; BERNIER, H. Numerical Simulation of Soil Heat Exchanger-storage Systems for Greenhouses. **Solar Energy**, v. 60, n. 6, p. 333–346, 1 jun. 1997.

HOLLMULLER, P. Analytical Characterisation of Amplitude-dampening and Phase-shifting in Air/Soil Heat-exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 22, p. 4303–4317, 1 out. 2003.

HOLLMULLER, P. *et al.* Déphaseur Thermique Diffusif. **Université de Genève**, v. 1, p. 91–98, 2004.

HOLLMULLER, P. *et al.* Potential of Buried Pipes Systems and Derived Techniques for Passive Cooling of Buildings in Brazilian Climates. **Université de Genève**. p. 1–22, 2006.

INATOMI, T. A. H. **Análise da Eficiência Energética do Sistema de Condicionamento de Ar com Distribuição pelo Piso em Ambiente de Escritório, na Cidade de São Paulo, Utilizando o Modelo Computacional EnergyPlus**. 2008. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo.

JANSSENS, A.; PAEPE, M. DE. Design of Earth-air Heat Exchangers. **Research in Building Physics**, p. 835–842, 17 dez. 2003.

KABASHNIKOV, V. P. *et al.* Analytical and Numerical Investigation of the Characteristics of a Soil Heat Exchanger for Ventilation Systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 11, p. 2407–2418, 1 maio 2002.

KURPASKA, S. *et al.* Simulation of Heat and Moisture Transfer in the Greenhouse Substrate due to a Heating System by Buried Pipes. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 1, p. 63–74, 2004.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2014.

LEVIT, H. J.; GASPAR, R.; PIACENTINI, R. D. Simulation of Greenhouse Microclimate Produced by Earth Tube Heat Exchangers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 47, n. 1, p. 31–47, 1 jul. 1989.

LOMBARDI, H. **Simulação Numérica da Transferência Simultânea de Energia e Umidade Através do Solo em um Sistema Trocador-armazenador de Calor**. 2005. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES, F. S. M. E. **Dimensionamento de um Permutador de Calor Terra-Ar e Avaliação de Impacto na Climatização de um Edifício**. 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa.

MEDEIROS, M. B. DE; OMIDO, A. R. Monitoramento da Temperatura do Subsolo de Fátima do Sul-MS para o Emprego de Sistema Geotérmico na Climatização de Edificações. Universidade Federal da Grande Dourados, p. 1-13, 2018.

MIHALAKAKOU, G.; LEWIS, J. O.; SANTAMOURIS, M. The Influence of Different Ground Covers on the Heating Potential of Earth-to-air Heat Exchangers. **Renewable Energy**, v. 7, n. 1, p. 33–46, 1 jan. 1996.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. Modelling the Earth Temperature Using Multiyear Measurements. **Energy and Buildings**, v. 19, n. 1, p. 1–9, 1992.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

MOLLISON, B. **Introdução À Permacultura**. Tradução: André Luis Jaeger Soares - Brasília: Projeto Novas Fronteiras da Cooperação para o Desenvolvimento Sustentável, 1998.

MUSSKOPF, D. B. **Estudos Exploratórios sobre Ventilação Natural por Tubos Enterrados**. 2006. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NUNES, A. de B. **MADOQ - Tubos, Válvulas e Conexões**. 27 jul. 2012. Disponível em: <<https://www.madoq.com.br/index.html>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

PAPST, A. L. **Uso De Inércia Térmica no Clima Subtropical Estudo de Caso em Florianópolis-SC**. 1999. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PURI, V. M. Feasibility and Performance Curves for Intermittent Earth Tube Heat Exchangers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 29, n. 2, p. 526–532, 1 mar. 1986.

SANTAMOURIS, M. *et al.* Energy Conservation in Greenhouses With Buried Pipes. **Energy**, v. 21, n. 5, p. 353–360, 1 maio 1996.

SANTANA, B. G.; RIBEIRO, M. E. S. **Implementação de Permutador de Calor Solo-Ar (EAHE) para Melhorar o Conforto Térmico de Edificações**. 2019. 75 p. Monografia (Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília.

SCHULZ, E. **Eficiência no Uso de Tubos Enterrados para Ventilação de Residências**. 2011. 19 p. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

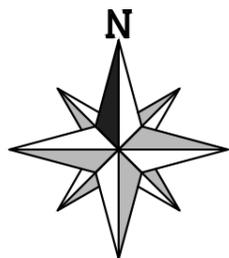
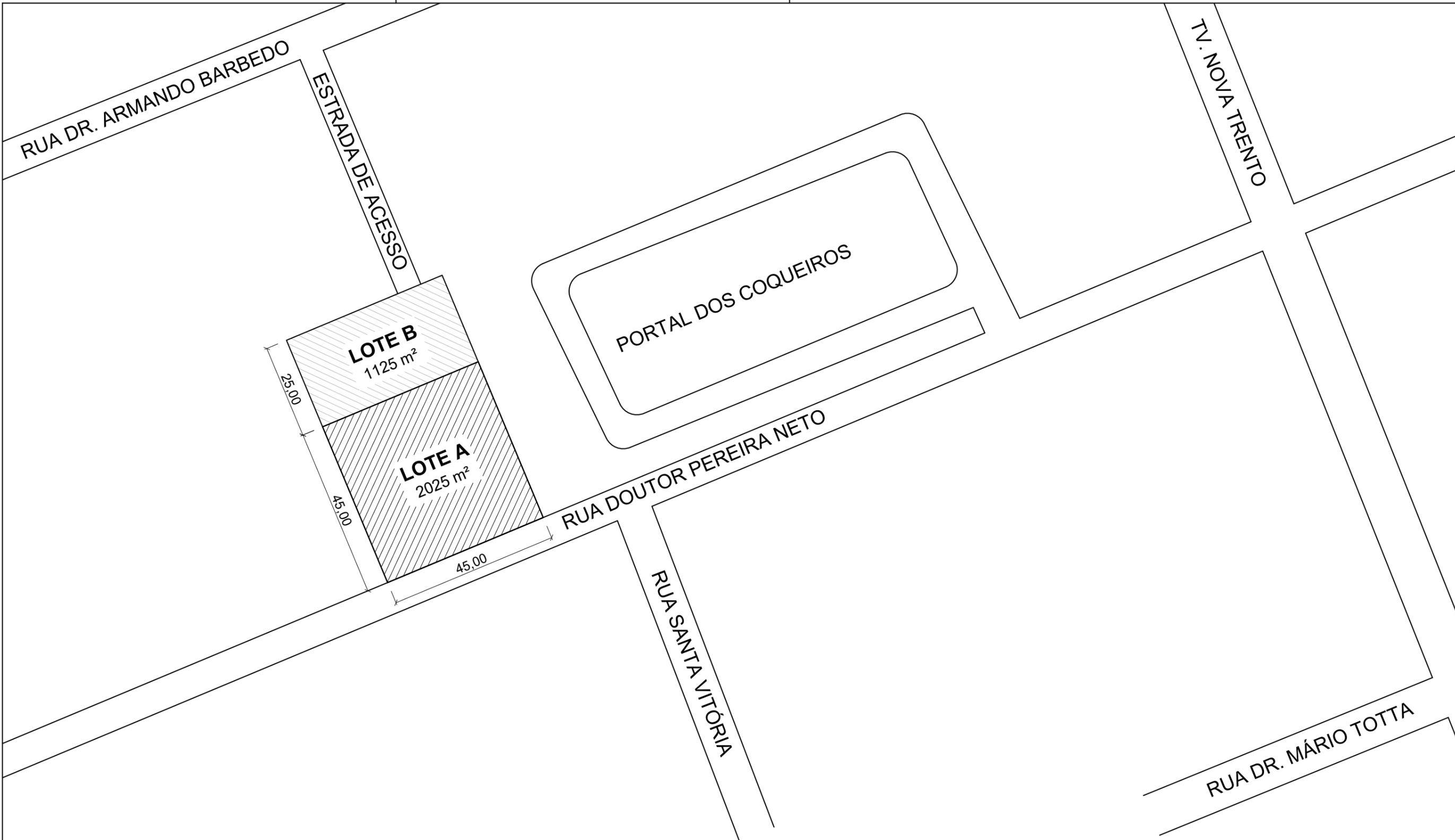
SOUZA, H. A. DE; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da Inércia Térmica do Solo e da Ventilação Natural no Desempenho Térmico: Um Estudo de Caso de Um Projeto Residencial em Light Steel Framing. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 113–128, dez. 2011.

TZAFERIS, A. *et al.* Analysis of the Accuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of Earth-to-air Heat Exchangers. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 35–43, 1 jan. 1992.

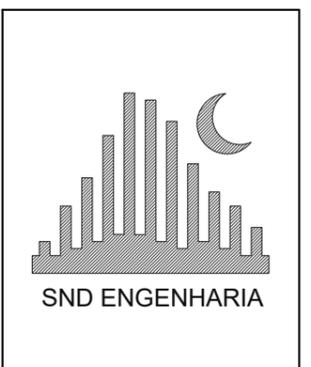
VAZ, J. **Estudo Experimental e Numérico Sobre o Uso do Solo como Reservatório de Energia para o Aquecimento e Resfriamento de Ambientes Edificados**. 2011. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ZANCHETI, S.; AZEVEDO, G.; MOURA, C. **A Conservação do Patrimônio no Brasil Teoria e Prática**. Olinda: Centro de Estudos Avançados da Conservação Integrada, 2015

APÊNDICE A – Projeto arquitetônico da residência unifamiliar



EMPREENDIMENTO:	EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR		
ENDEREÇO:	R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS		
PROJETO:	ARQUITETÔNICO		
ASSUNTO:	PLANTA DE SITUAÇÃO		
AUTOR:	SAMUEL NUNES DOEGE		
ESCALA:	1:500	UNIDADE:	M
		PRANCHA:	1 / 6



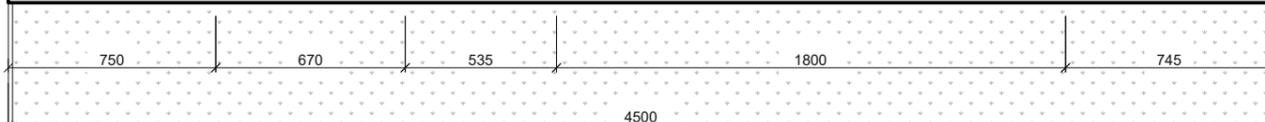
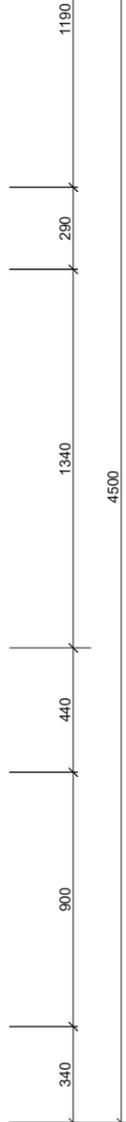
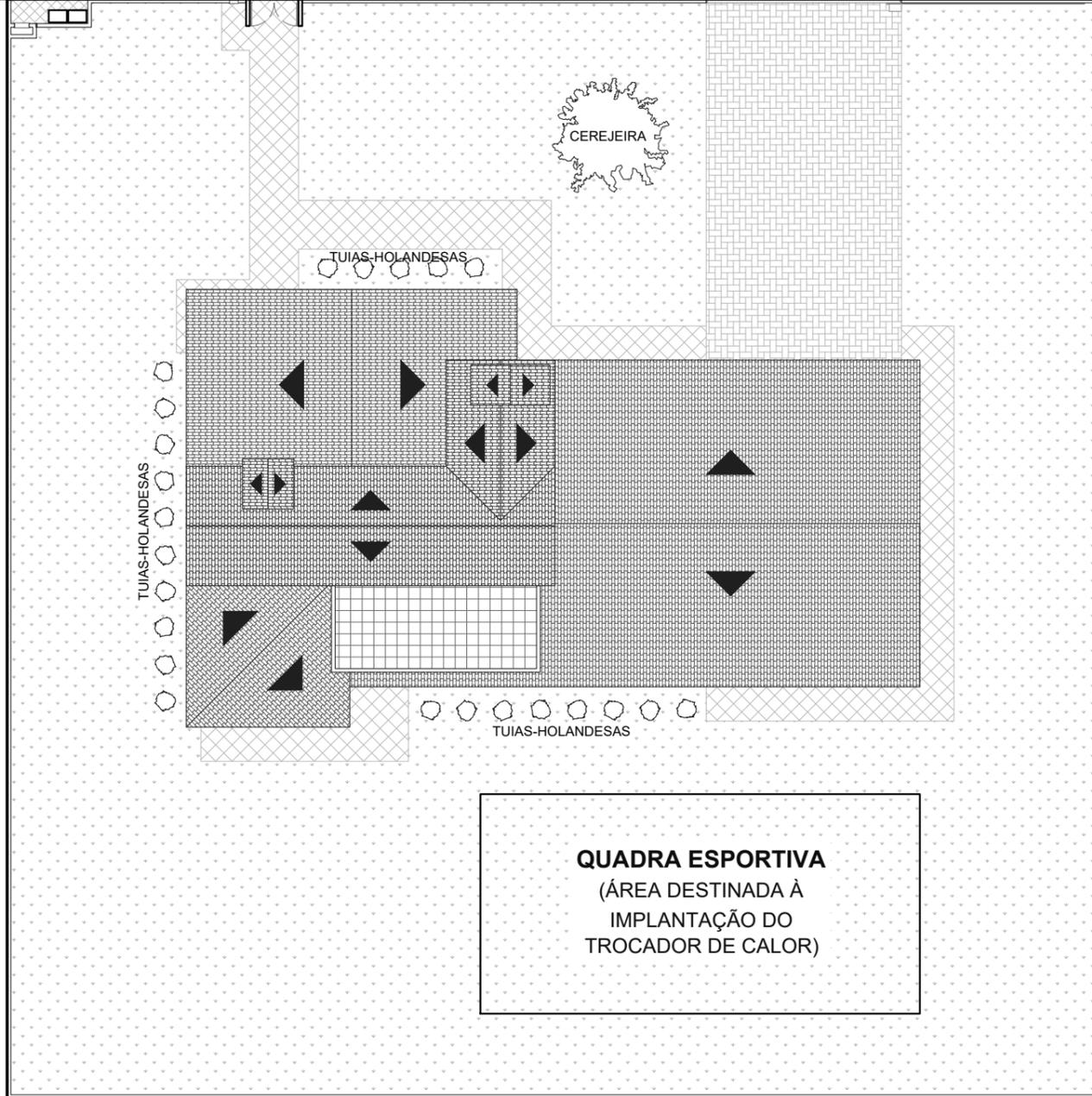
RUA DOUTOR PEREIRA NETO

MEDIDORES DE
ÁGUA E LUZ

ENTRADA
(PEDESTRES)

PASSEIO PÚBLICO

ENTRADA
(VEÍCULOS)



QUADRA ESPORTIVA
(ÁREA DESTINADA À
IMPLANTAÇÃO DO
TROCADOR DE CALOR)

LOTE B
(PARTE DO TERRENO
DESTINADA A OUTRO
EMPREENDIMENTO)

**Estrada
de
acesso**



EMPREENDIMENTO: **EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR**

ENDEREÇO: **R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS**

PROJETO: **ARQUITETÔNICO**

ASSUNTO: **PLANTA DE COBERTURA/LOCALIZAÇÃO**

AUTOR: **SAMUEL NUNES DOEGE**

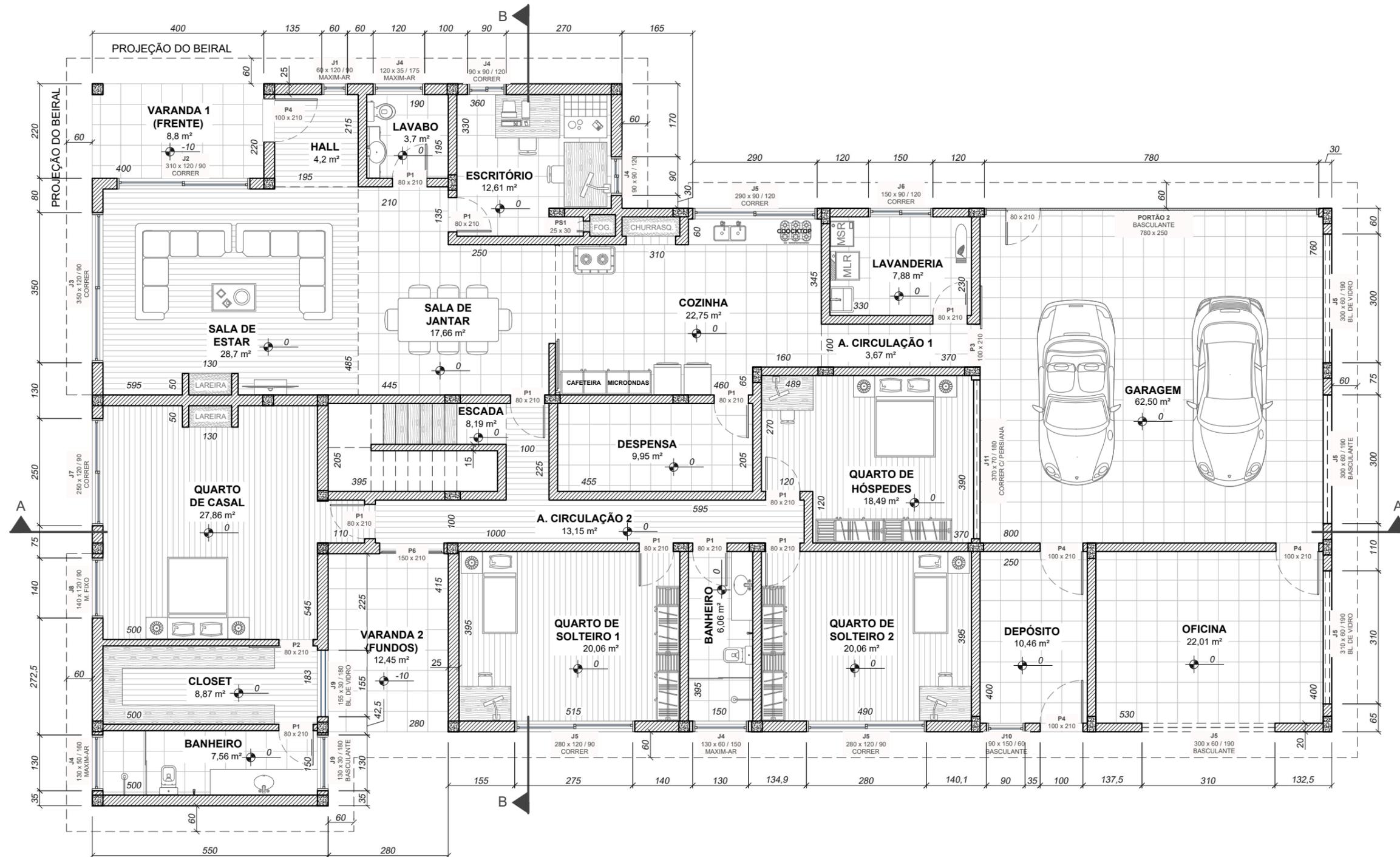
ESCALA: **1:200**

UNIDADE: **M**

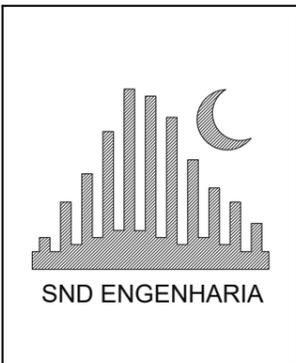
PRANCHA: **2 / 6**

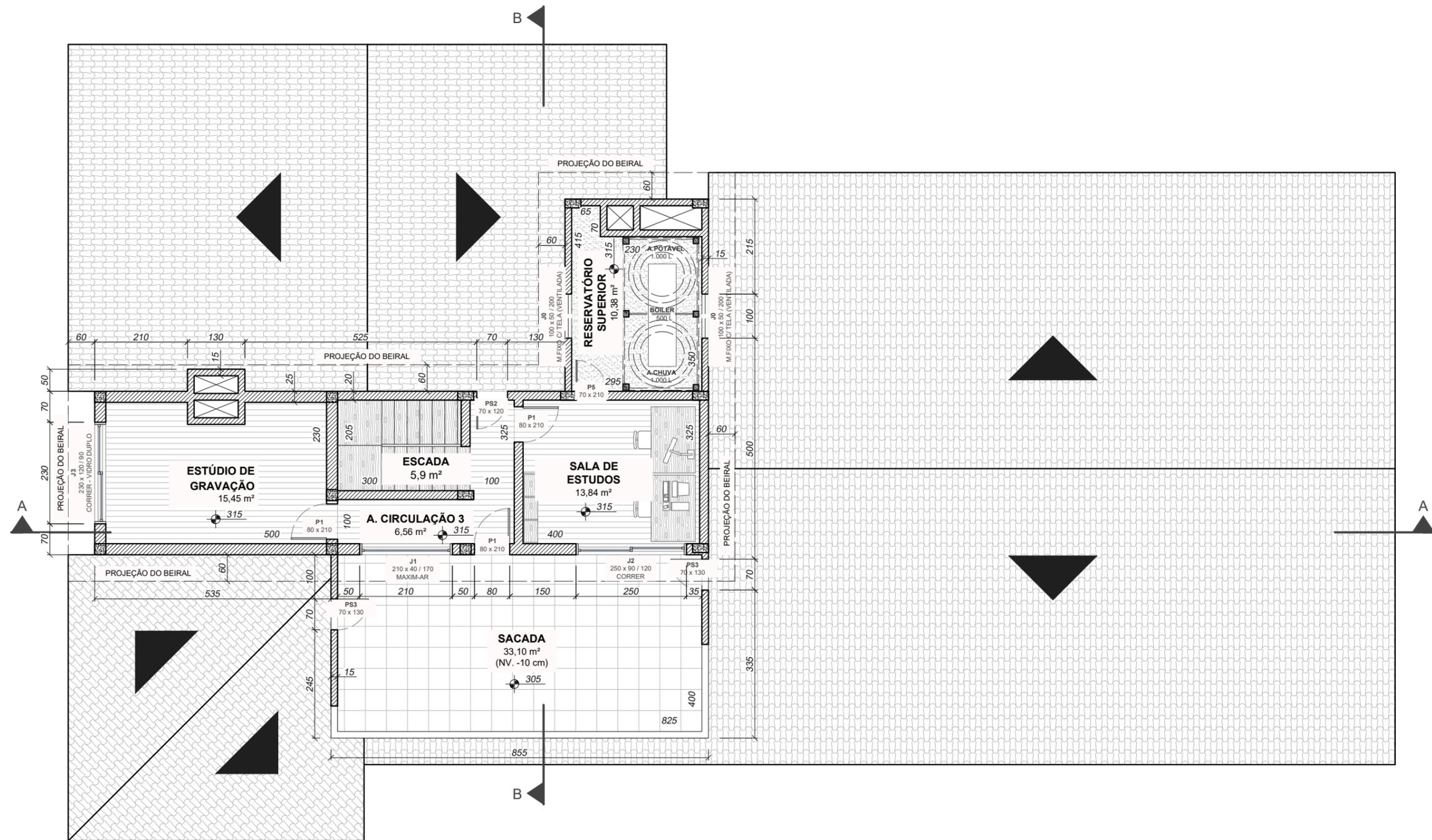


SND ENGENHARIA

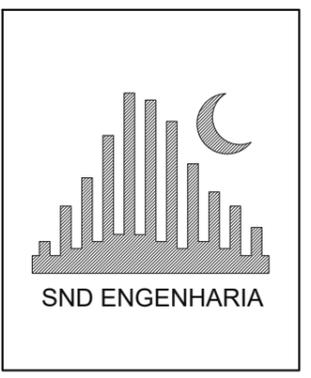


EMPREENDIMENTO:	EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR		
ENDEREÇO:	R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS		
PROJETO:	ARQUITETÔNICO		
ASSUNTO:	PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TÉRREO		
AUTOR:	SAMUEL NUNES DOEGE		
ESCALA:	1:100	UNIDADE:	CM
		PRANCHA:	3 / 6



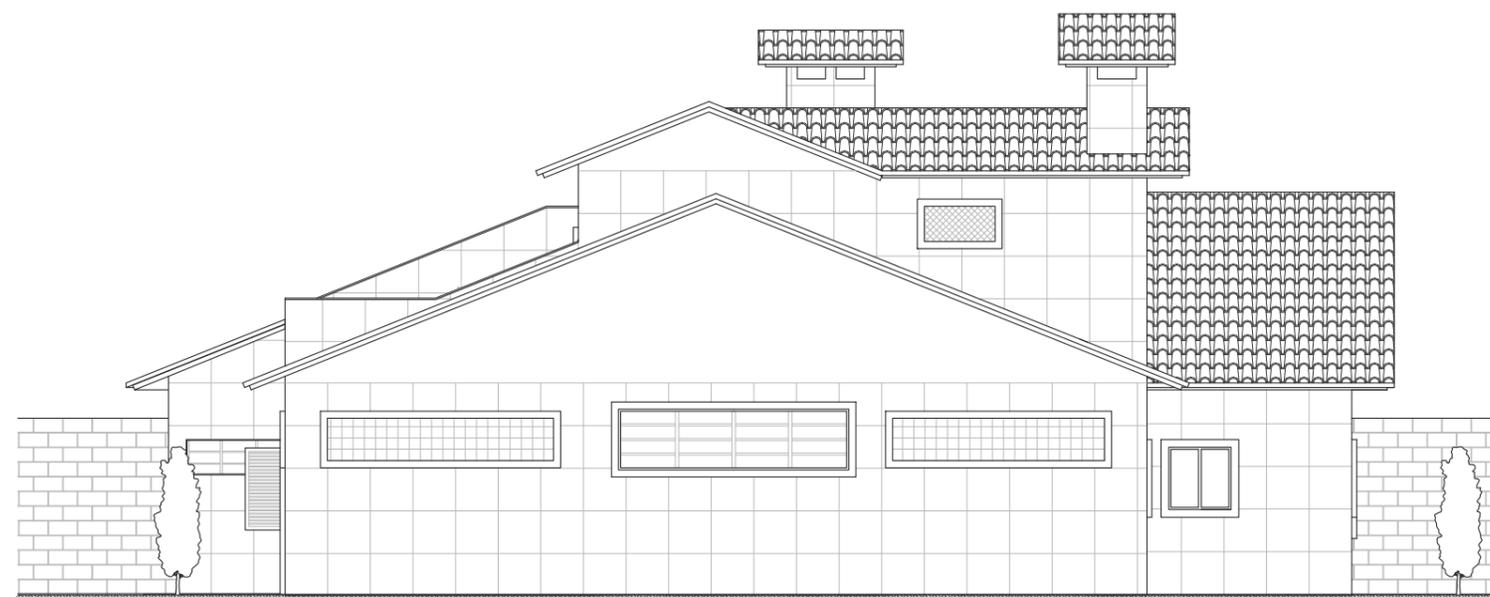


EMPREENDIMENTO:	EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR		
ENDEREÇO:	R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS		
PROJETO:	ARQUITETÔNICO		
ASSUNTO:	PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO SUPERIOR		
AUTOR:	SAMUEL NUNES DOEGE		
ESCALA:	1:100	UNIDADE:	CM
		PRANCHA:	4 / 6





FACHADA FRONTAL (SUL)



FACHADA LATERAL (OESTE)

EMPREENDIMENTO: EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR

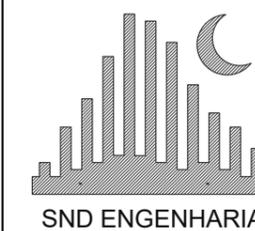
ENDEREÇO: R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS

PROJETO: ARQUITETÔNICO

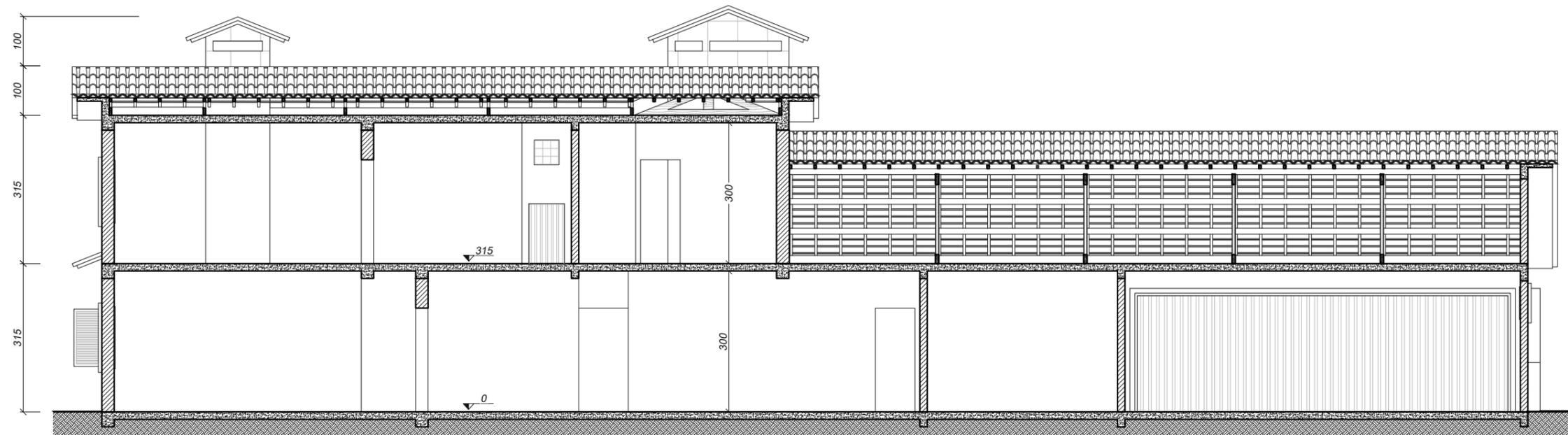
ASSUNTO: FACHADAS

AUTOR: SAMUEL NUNES DOEGE

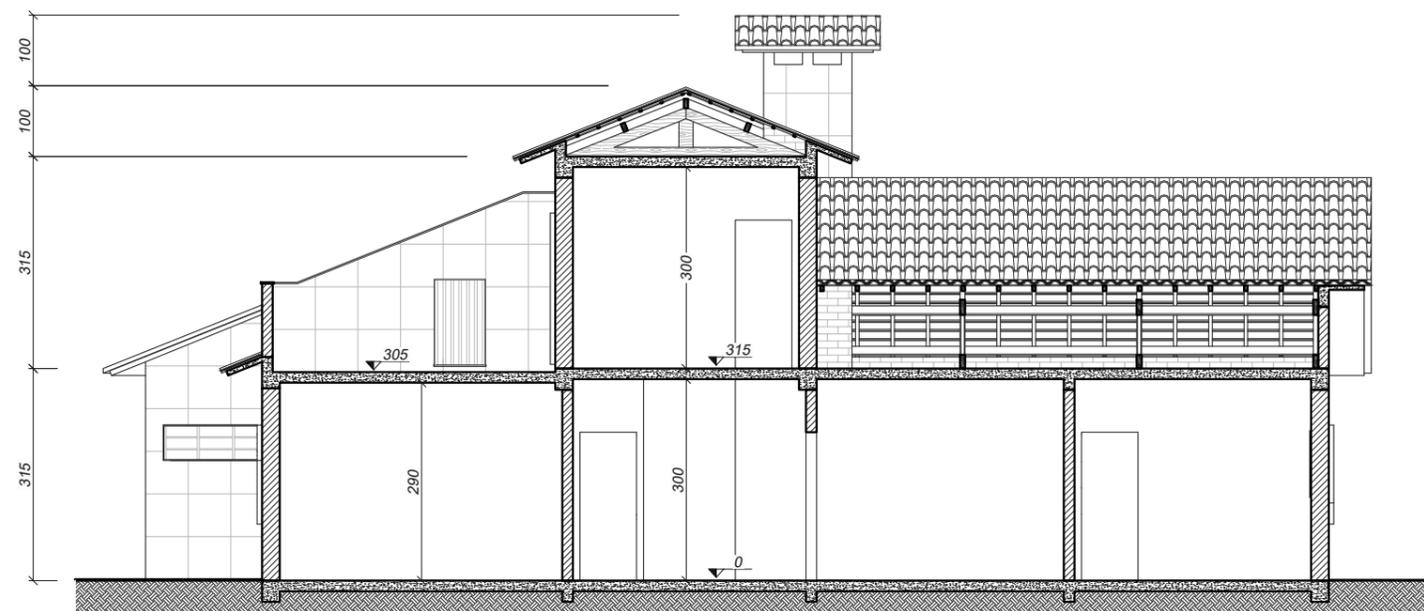
ESCALA: 1:100 UNIDADE: - PRANCHA: 5 / 6



SND ENGENHARIA



CORTE A-A



CORTE B-B

EMPREENDIMENTO: **EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR**

ENDEREÇO: **R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS**

PROJETO: **ARQUITETÔNICO**

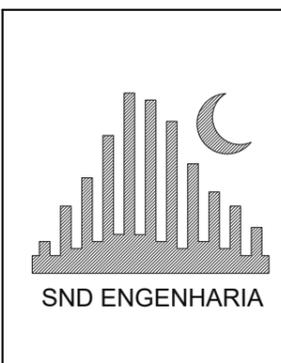
ASSUNTO: **VISTAS EM CORTE**

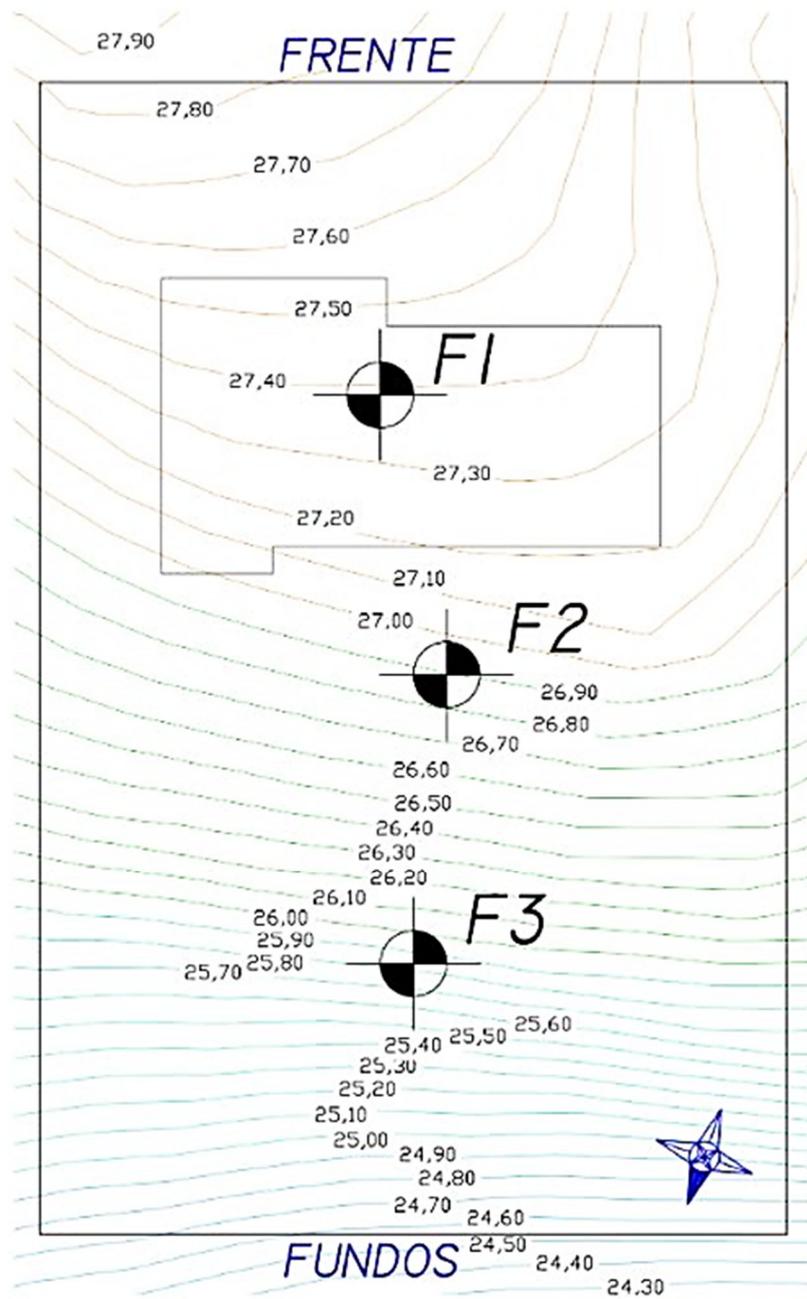
AUTOR: **SAMUEL NUNES DOEGE**

ESCALA: **1:100**

UNIDADE: **CM**

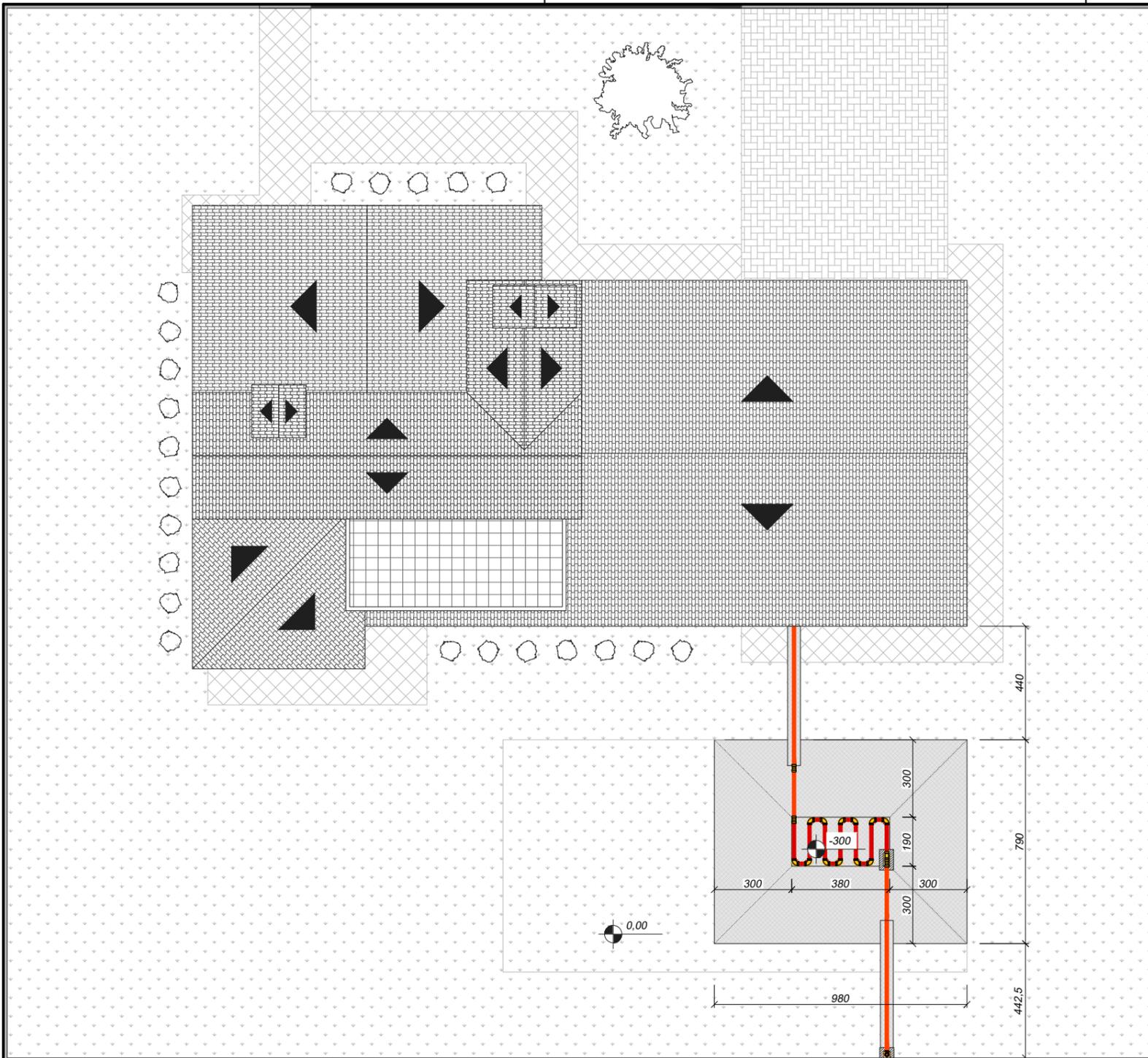
PRANCHA: **6 / 6**



APÊNDICE B – Topografia do terreno, residência e pontos de sondagem

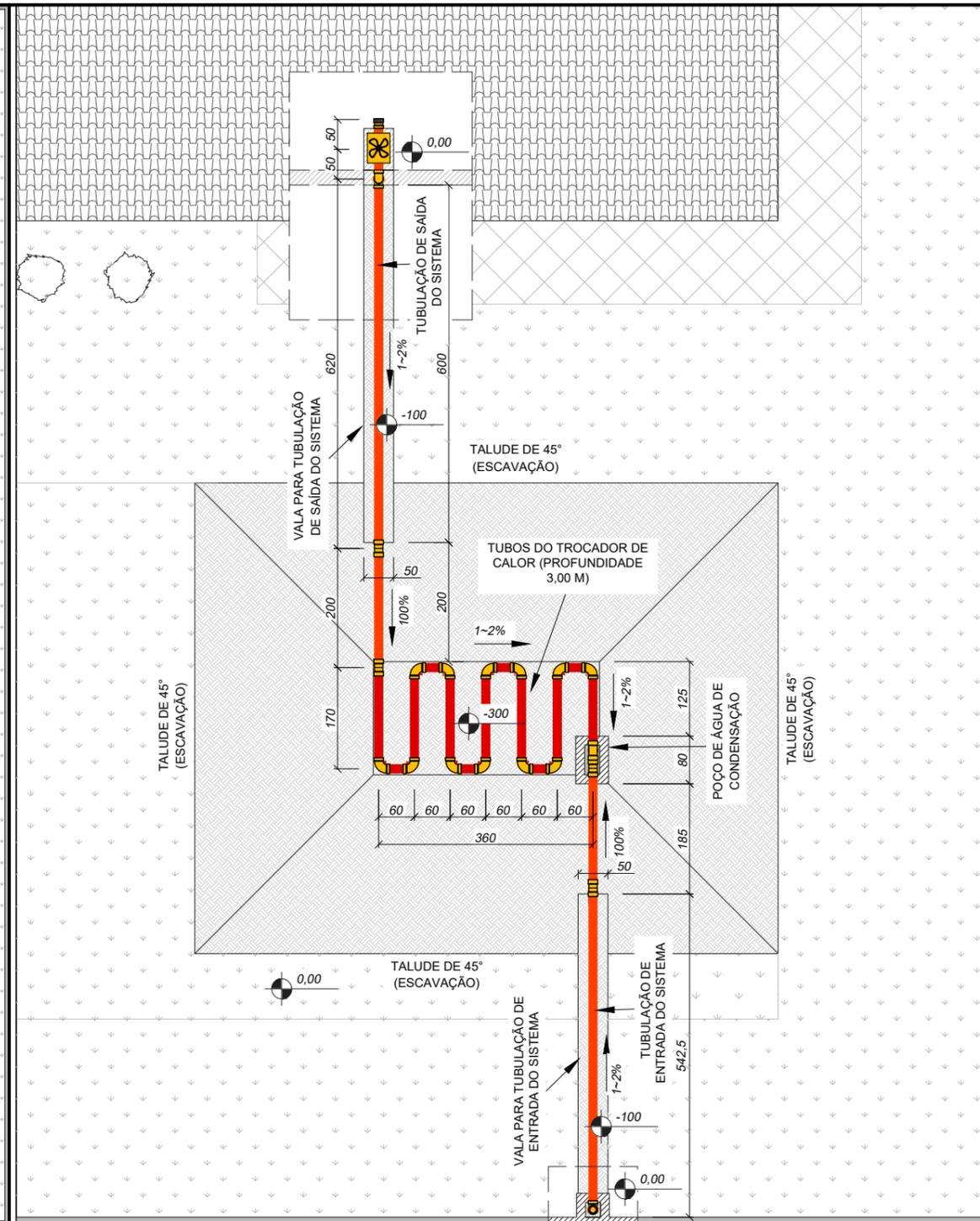
(fonte: de autoria própria)

APÊNDICE C – Projeto executivo do Trocador de Calor Solo-ar



PLANTA DE LOCAÇÃO DAS ESCAVAÇÕES

ESCALA: 1:200



PLANTA BAIXA DO TROCADOR DE CALOR

ESCALA: 1:100

LEGENDA (S/ ESCALA):

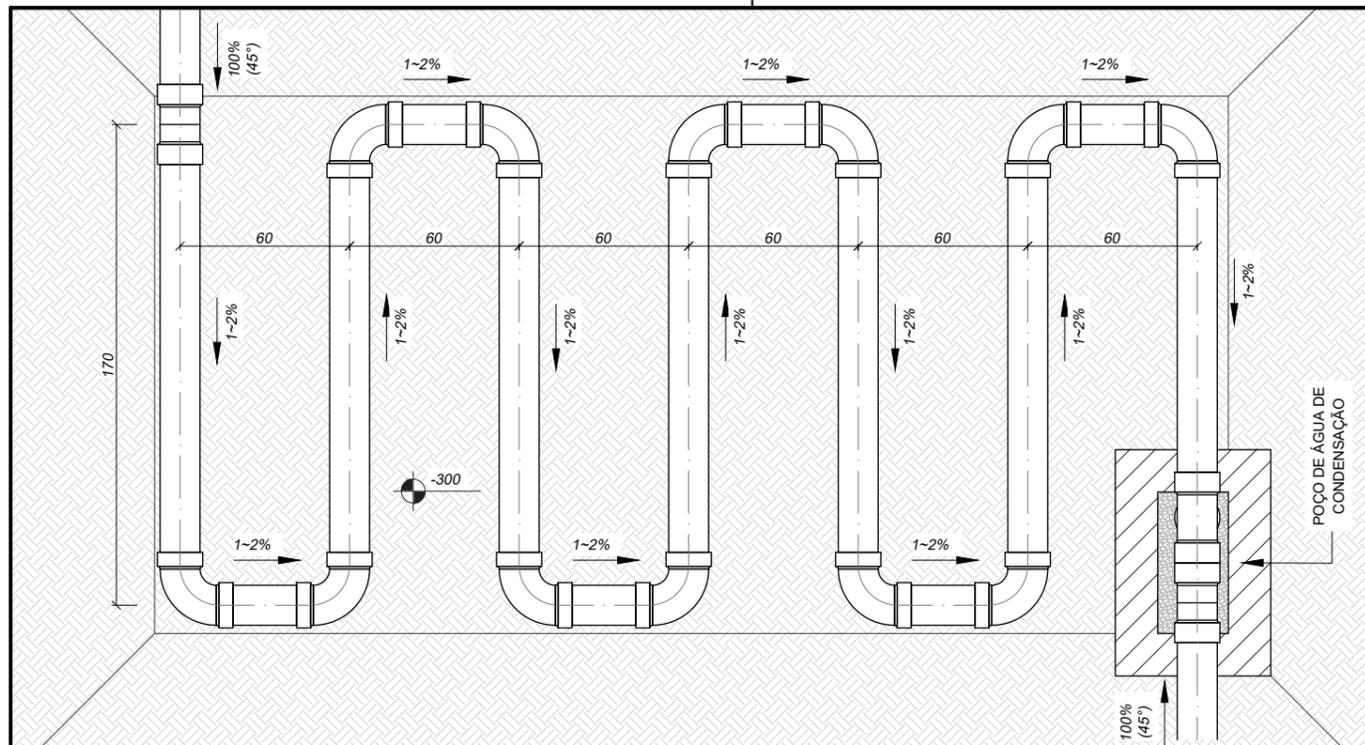
- TUBOS TIPO SCHEDULE SÉRIE STANDARD DN 5" (NV = -300)
- TUBOS TIPO SCHEDULE SÉRIE STANDARD DN 5" (NV > -300)
- CURVA DE 90°
- JOELHO DE 45°
- TÊ DE 90°
- INCLINAÇÃO DO TUBO
- FILTRO DE AR
- INSUFLADOR (VENTILADOR)



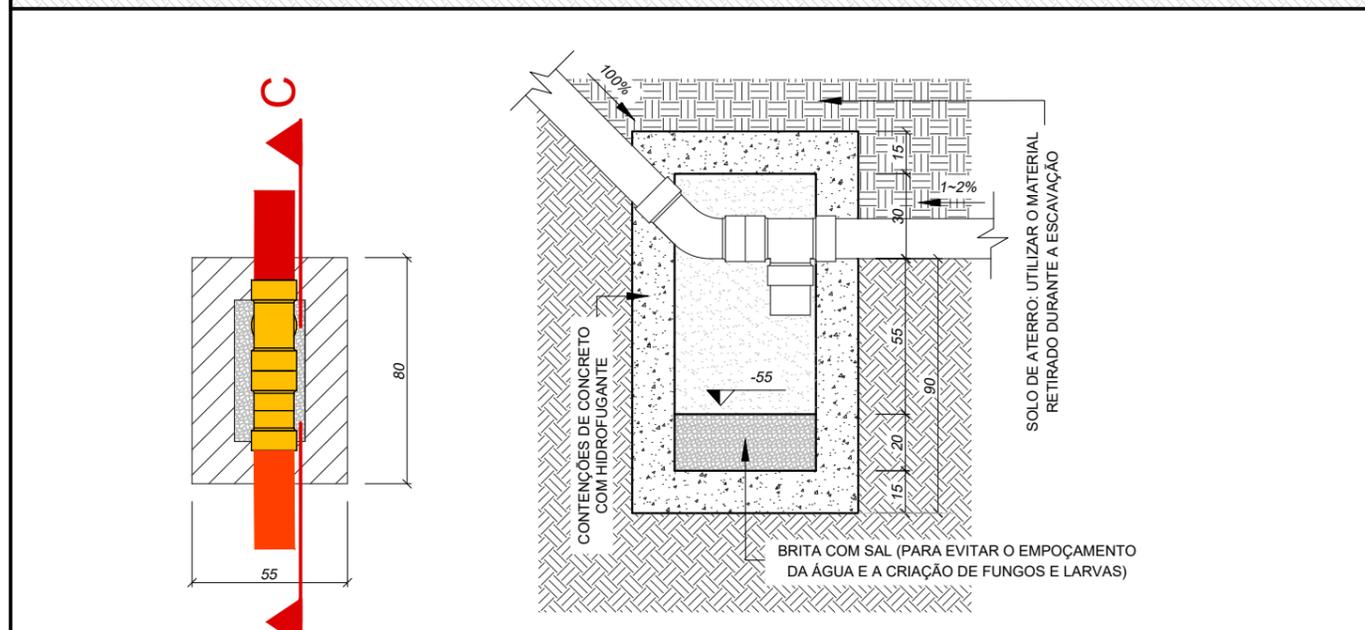
EMPREENHIMENTO:	EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR	
ENDEREÇO:	R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS	
PROJETO:	TROCADOR DE CALOR SOLO-AR	
ASSUNTO:	LOCAÇÃO E PLANTA BAIXA	
AUTOR:	SAMUEL NUNES DOEGE	
ESCALA:	INDICADA	UNIDADE: CM
		PRANCHA: 1 / 2



SND ENGENHARIA

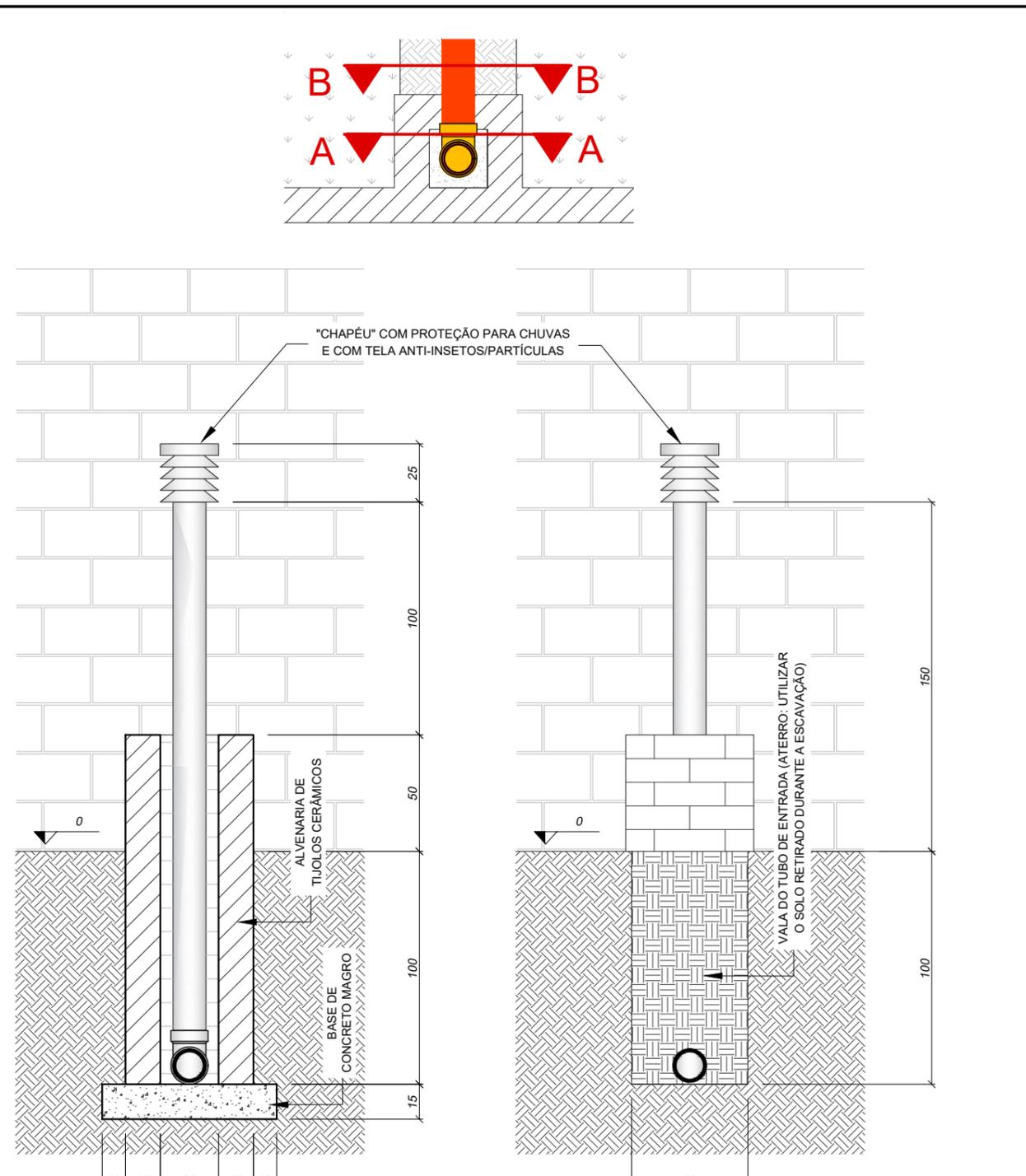


DETALHAMENTO DO TROCADOR DE CALOR



CORTE C-C

DETALHAMENTO DO POÇO DE ÁGUA DE CONDENSAÇÃO



CORTE A-A

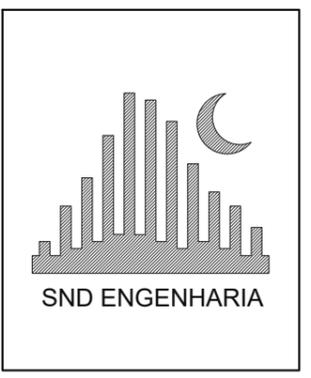
CORTE B-B

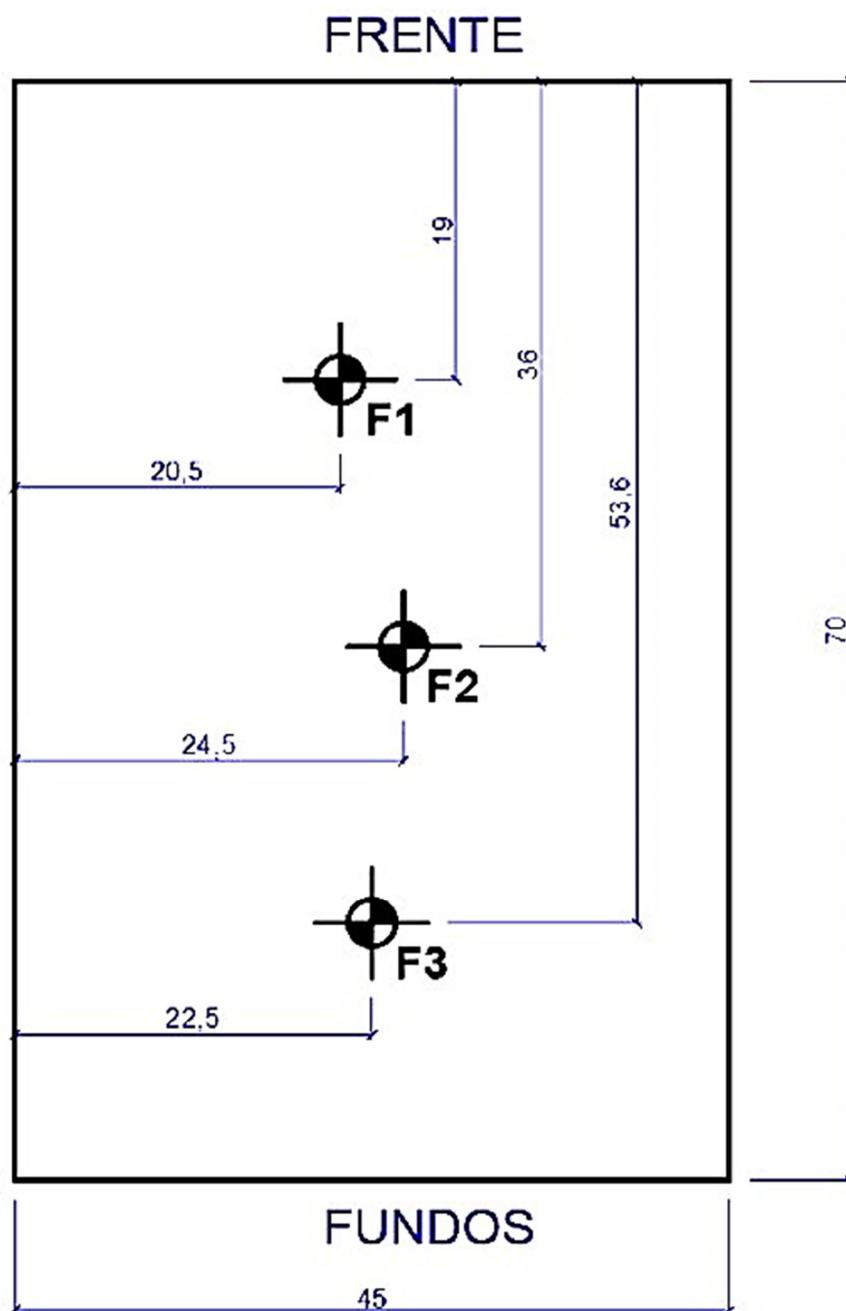
DETALHAMENTO DA "CHAMINÉ"

LEGENDA (S/ ESCALA):

- TUBOS TIPO SCHEDULE SÉRIE STANDARD DN 5" (NV = -300)
- TUBOS TIPO SCHEDULE SÉRIE STANDARD DN 5" (NV > -300)
- CURVA DE 90°
- JOELHO DE 45°
- INCLINAÇÃO DO TUBO
- TÊ DE 90°

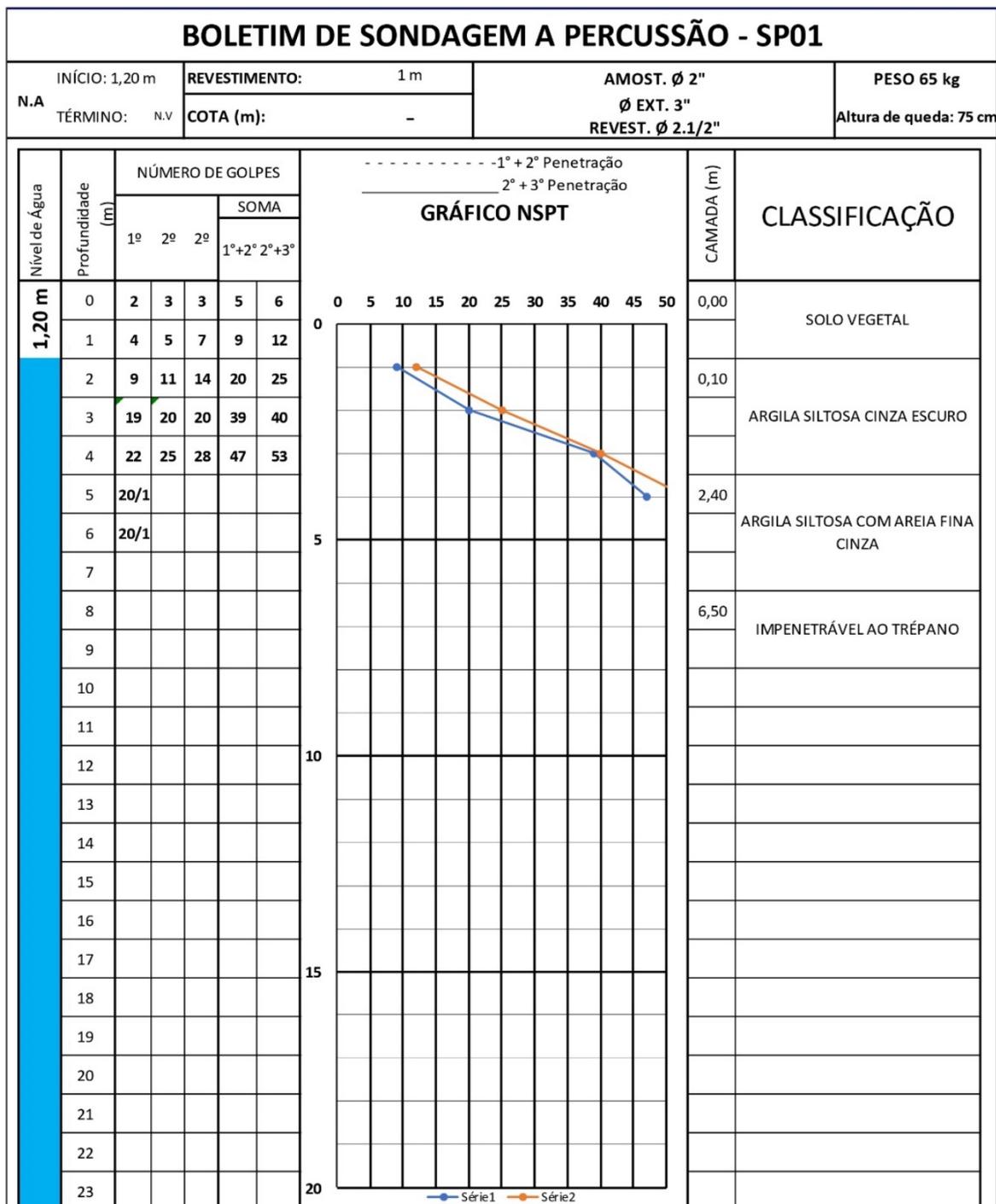
EMPREENDIMENTO:	EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR
ENDEREÇO:	R. DR. PEREIRA NETO, 530 - PORTO ALEGRE - RS
PROJETO:	TROCADOR DE CALOR SOLO-AR
ASSUNTO:	DETALHAMENTO
AUTOR:	SAMUEL NUNES DOEGE
ESCALA:	1:25
UNIDADE:	CM
PRANCHA:	2 / 2



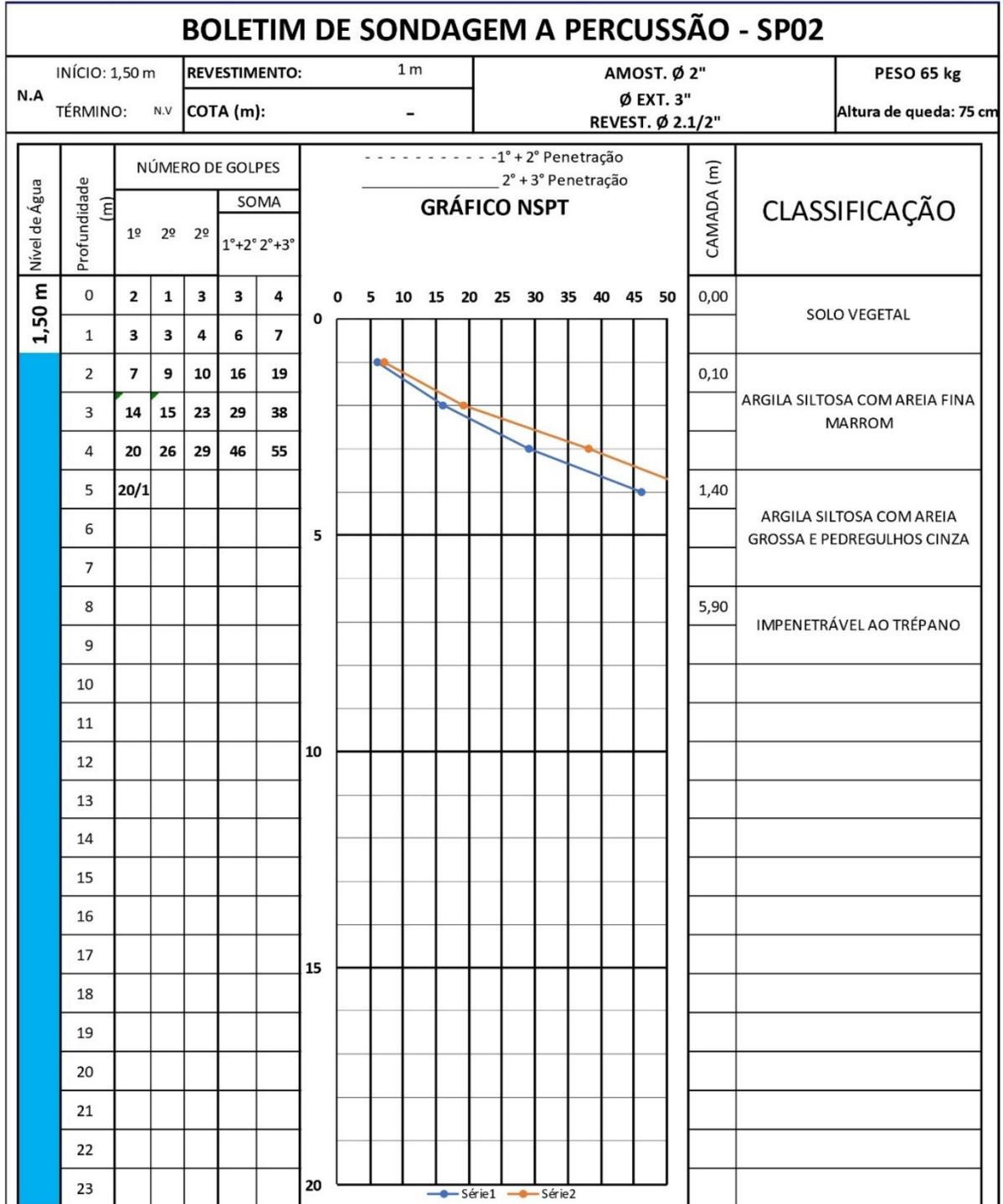
ANEXO A – Relatório de sondagem: locação dos furos

(fonte: adaptado de Bertoldi Estacas e Fundações – Relatório de sondagem em SPT, 2023)

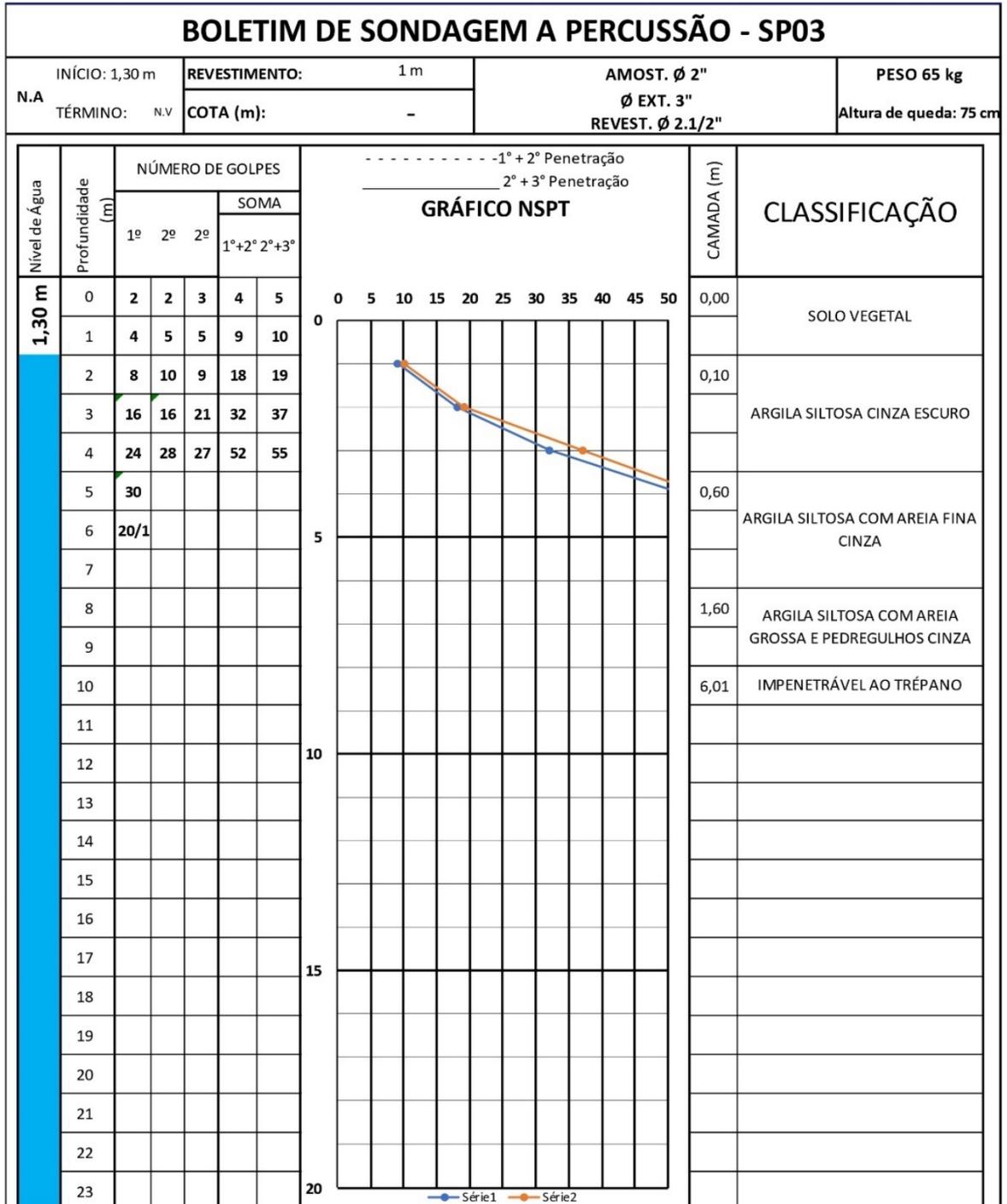
ANEXO B – Relatório de sondagem: boletins de sondagem



(fonte: Bertoldi Estacas e Fundações – Relatório de sondagem em SPT, 2023)



(fonte: Bertoldi Estacas e Fundações – Relatório de sondagem em SPT, 2023)



(fonte: Bertoldi Estacas e Fundações – Relatório de sondagem em SPT, 2023)