

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO
CONDICIONAMENTO GEOTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
NO RIO GRANDE DO SUL**

Roberto Hübner Barcelos

Porto Alegre - RS

2018

Roberto Hübner Barcelos

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO
CONDICIONAMENTO GEOTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre - RS

2018

B242 Barcelos, Roberto Hübner

Viabilidade técnica e econômica do condicionamento geotérmico de edificações no Rio Grande do Sul / Roberto Hübner Barcelos. – 2018.

161 f. : il. color.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Condicionamento térmico de edificações. 2. Eficiência energética. 3. Geotermia. 4. Modelagem e simulação computacional. 5. Estudo de viabilidade econômica. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Título.

CDU: 697:620.9(043)=134.3

Roberto Hübner Barcelos

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO
CONDICIONAMENTO GEOTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
NO RIO GRANDE DO SUL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma atual pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 05 de fevereiro de 2018

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D., Concordia University, Canada
Orientador
Coordenador PPGEC – UFRGS

Banca Examinadora

Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dra., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Mauricio Carvalho Ayres Torres (IMED)
Dr., Universitat Politècnica de Catalunya, España

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques (UFRGS)
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Este trabalho surgiu durante uma visita de curta duração à sede da Transsolar Energietechnik GmbH, em Stuttgart em 2015, a convite do Arquiteto Christian Degenhardt. É a ele e à Transsolar que vão meus primeiros agradecimentos pela inestimável experiência e pela visão do estado da arte das tecnologias de eficiência energética a nível mundial. Agradeço também à Engenheira Christina Nahkle, cujo trabalho original foi a inspiração para esta pesquisa e que muito colaborou nos estágios iniciais.

O caminho até a defesa desta pesquisa foi longo e, algumas vezes, bastante árduo, devido a dificuldades externas que, em maior ou menor grau, também afetam boa parte da pesquisa acadêmica no Brasil. Agradeço imensamente à minha família, meus pais e meu irmão, pelo apoio e suporte dado durante os períodos mais difíceis, como foi desde a graduação. Por último, mas especialmente, devo agradecimentos especiais ao meu coordenador, o Prof. Nilo Consoli, que se tornou o maior defensor do meu trabalho e cuja ajuda foi valiosíssima para que este trabalho finalmente viesse a público.

“The cleanest and cheapest energy is the non-produced one.”

UNIDO

RESUMO

BARCELOS, Roberto Hübner. Viabilidade técnica e econômica do condicionamento geotérmico de edificações no Rio Grande do Sul. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O elevado consumo energético de edificações para o seu condicionamento térmico já é um dos maiores impactos ambientais da construção civil nos países desenvolvidos e, progressivamente, vem se tornando uma preocupação também nos países em desenvolvimento. Uma alternativa renovável relativamente recente, tanto para aquecimento como para resfriamento, são as bombas de calor geotérmicas (*ground source heat pumps*, GSHPs), que se valem da inércia térmica do solo para reduzir significativamente a demanda energética em relação ao ar. Apesar do seu grande potencial em reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono, esta tecnologia ainda é quase inexistente na América Latina, não somente devido à falta de conhecimento ao seu respeito, mas também pela incerteza quanto à sua viabilidade frente a um custo inicial mais elevado. Embora existam muitas pesquisas sobre o funcionamento de GSHPs, grande parte do conhecimento prático quanto ao projeto, desempenho e viabilidade é baseada na experiência dos primeiros países onde a tecnologia começou a se tornar popular, e não pode ser assumida automaticamente como válida em outras situações sem uma avaliação prévia. Estudos anteriores apontaram que o retorno econômico de GSHPs tende a ser maior em climas mais frios, enquanto a eficiência tende a ser maior em climas mais amenos, mas com sazonalidade. Por apresentar um bom balanço destas características, o Estado do Rio Grande do Sul apresenta potencial para um desempenho elevado de GSHPs. O objetivo deste trabalho é estimar os níveis de eficiência que esta tecnologia pode atingir em uma cidade de referência no Estado, assim como seu retorno econômico frente a ASHPs (*air source heat pumps*, ou seja, aparelhos de ar condicionado, ou A/C), seus limitantes e as dificuldades de projeto. Uma edificação unifamiliar residencial em Porto Alegre, projetada especialmente para estudos de sustentabilidade, foi utilizada como caso de estudo para o projeto conceitual completo de um GSHP vertical, um GSHP horizontal e um ASHP. Foram estimadas a demanda de energia e os custos de operação e de implantação para determinadas condições, que foram comparadas em um estudo de viabilidade econômica. Após, os resultados foram extrapolados por uma análise de sensibilidade para condições mais genéricas de consumo. Através dos cálculos, observou-se que a tecnologia de GSHPs atingiu o dobro da eficiência dos A/C mais eficientes disponíveis para o caso de estudo. Economicamente, a tecnologia também se mostrou viável, e foram estimados limitantes econômicos a esta viabilidade. Por fim, o processo de projeto desenvolvido pode servir de auxílio a novos projetistas na área.

Palavras-chave: Condicionamento térmico de edificações; eficiência energética; geotermia; modelagem e simulação computacional; estudo de viabilidade econômica.

ABSTRACT

BARCELOS, Roberto Hübner. Technical and economic feasibility of geothermal conditioning of buildings in Rio Grande do Sul. 2018. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Program of Post-Graduation in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The high energy consumption in buildings for their thermal conditioning is already one of the greatest environmental impacts of civil construction in developed countries and, progressively, is also becoming a concern in the developing countries. A relatively recent renewable alternative, as much for heating as for cooling, are the ground source heat pumps, GSHPs, which take advantage of the thermal inertia of the ground to significantly decrease the energy demand comparing to air as a source. In spite of their huge potential for decreasing energy consumption and carbon emissions, this technology is still almost inexistent in Latin America, due not only to lack of awareness, but mainly to uncertainties about their feasibility because of their higher investment cost. Although there are many researches about the characteristics and operation of GSHPs, great part of the practical knowledge as to the design, performance and feasibility is based in the experience from the first countries where the technology spreaded, and cannot be automatically assumed as valid without a previous evaluation. Former studies indicated that the economic profit of GSHPs tends to be higher in colder climates, while the efficiency tends to be higher in milder, but still seasonal climates. For presenting a good balance among these factors, the Rio Grande do Sul State shows potential for a high performance of GSHPs. The objective of this work is to estimate the efficiency levels that can be reached by this technology in a reference city in the State, as its financial feedback compared to ASHPs (air source heat pumps, the traditional air conditioners, or A/C), its limitations and the design difficulties. A residential single-family building in Porto Alegre, specifically designed for sustainability studies, was used as case study for the complete conceptual design of a vertical GSHP, a horizontal GSHP and an ASHP. The energy demand and operation and installation costs for specific conditions were estimated and compared in a economic feasibility study. After, the results were extrapolated through a sensitivity analysis for more generic situations of consumption. Through the calculations, it was observed that the technology achieved twice the efficiency of the most efficient A/C available for the case study. Economically, the technology showed itself viable, and economic limitations were also estimated. At last, the developed design process can also serve as aid to new designers in the field.

Keywords: Thermal conditioning of buildings; energy efficiency; Geothermy; computational modelling and simulation; economic feasibility study.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTO	20
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA.....	26
1.3	QUESTÕES DE PESQUISA	28
1.4	OBJETIVOS.....	28
1.5	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	29
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	METODOLOGIA	31
2.1	POSICIONAMENTO DA PESQUISA.....	31
2.2	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	33
3	CONDICIONAMENTO GEOTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	36
3.1	ENERGIA GEOTÉRMICA	36
3.1.1	Níveis de temperatura e aplicações	36
3.1.2	Tecnologia geotérmica rasa.....	37
3.1.3	Energia geotérmica como parte do projeto da edificação	39
3.2	BOMBAS DE CALOR	41
3.2.1	Princípio de operação	41
3.2.2	Tipos de bombas de calor.....	44
3.2.3	Eficiência energética de uma bomba de calor.....	46
3.3	BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS (GSHP).....	48
3.3.1	Groundwater heat pumps (GWHP).....	48
3.3.2	Surface water heat pumps (SWHP).....	49
3.3.3	Ground-coupled heat pumps (GCHP).....	50
3.4	TROCADORES DE CALOR TERRA-AR (EAHX).....	53
3.5	LUCRATIVIDADE E POTENCIAL.....	55
3.5.1	Histórico e uso global.....	55
3.5.2	Comparação com alternativas tradicionais.....	57
3.5.3	Sistemas híbridos.....	60
3.5.4	Potencial como energia renovável.....	61
4	PROJETO DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS.....	63

4.1	MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA GCHPS	63
4.1.1	Transferência de calor fora do poço	64
4.1.2	Transferência de calor dentro do poço	66
4.1.3	Comparação.....	67
4.2	ABORDAGENS PARA O PROJETO DE GCHPS.....	67
4.2.1	Abordagem geral	67
4.2.2	Modelo de ASHRAE/Kavanaugh	69
4.2.3	Recomendações simplificadas da ASHRAE.....	73
4.3	PROGRAMAS DE COMPUTADOR PARA A SIMULAÇÃO DE GCHPS	75
5	LEVANTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO	77
5.1	CLIMA	77
5.2	GEOLOGIA	81
5.3	REQUISITOS DE USO E CONFORTO	85
5.4	EDIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	90
5.5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	93
5.5.1	Modelagem da edificação e calibração	93
5.5.2	Simulação energética da edificação	98
5.6	CUSTOS.....	102
5.6.1	Custos de investimento.....	102
5.6.2	Custos de operação	104
5.6.3	Taxas de juros.....	104
6	PROJETO DOS SISTEMAS.....	106
6.1	PROJETO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA: ASHP.....	106
6.2	PROJETO DOS SISTEMAS DE GSHPS.....	109
6.2.1	Projeto simplificado de GCHPs de acordo com as recomendações da ASHRAE ...	109
6.2.2	Projeto de um GCHP vertical.....	110
6.2.3	Projeto de um GCHP horizontal.....	114
7	ESTUDO DE VIABILIDADE.....	119
7.1	ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	119
7.2	ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	121
7.3	ANÁLISE DE SENSITIVIDADE	124
7.3.1	Análise pelos parâmetros de 2017.....	125
7.3.2	Análise pelos parâmetros de 2018.....	127

7.3.3	Influência da definição de conforto térmico.....	129
7.3.4	Influência do tipo de solo	130
7.4	ROTEIRO PARA PROJETO E VIABILIDADE	132
8	CONCLUSÕES	134
8.1	LIÇÕES APRENDIDAS.....	134
8.2	PESQUISAS FUTURAS	136
8.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
	APÊNDICE A – DETALHES CONSTRUTIVOS.....	148
	APÊNDICE B – ARQUIVO CLIMÁTICO	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desvios da temperatura média terrestre e marítima para Jan-Dez 2016.....	21
Figura 2: Anomalias das temperaturas médias para o verão e inverno no Brasil em 2016.....	22
Figura 3: Esquema típico de um GSHP.....	24
Figura 4: Metodologia geral de uma pesquisa em ciência do projeto.	32
Figura 5: Metodologia de pesquisa.....	34
Figura 6: Radiação solar absorvida e refletida.	38
Figura 7: Dependência da profundidade na variação anual de temperaturas do solo.....	38
Figura 8: Casas subterrâneas de indígenas Proto-Jê no sul do Brasil.....	40
Figura 9: Ciclo de vapor básico de uma bomba de calor.	41
Figura 10: Ciclo teórico de vapor em uma bomba de calor de um único estágio.	43
Figura 11: Ciclo termodinâmico real de um sistema em estágio único.....	43
Figura 12: Diferentes tipos de bombas de calor.	45
Figura 13: Fluxos de calor em um condicionamento térmico.	47
Figura 14: Sistema de um GWHP unitário.....	49
Figura 15: Um SWHP de circuito fechado em um lago.....	50
Figura 16: Funcionamento de um sistema de GCHP <i>water-to-air</i>	51
Figura 17: GCHP com tubulação horizontal <i>slinky</i>	52
Figura 18: GCHP com tubulação vertical.	53
Figura 19: EAHX: dutos de ar enterrados no protótipo Ventura.....	54
Figura 20: Diagrama de um HGCHP com: (a) torre de resfriamento, ou (b) coletor solar.....	60
Figura 21: Contribuição de GSHPs para a autossuficiência de energia do Bullitt Center.	62
Figura 22: Esquema de um poço vertical para diferentes formações de solo.....	63
Figura 23: Fluxo de calor interno e externo em um poço para um GCHP.....	69
Figura 24: Relação Número de Fourier/Fator-G para a resistência térmica do solo.	71
Figura 25: Porto Alegre e a classificação climática do Brasil.	77
Figura 26: Zoneamento bioclimático brasileiro pela NBR 15220.....	78
Figura 27: Perfil de temperaturas de Porto Alegre – 2006-2015.....	79
Figura 28: Perfil de precipitação de Porto Alegre – 2006-2015.....	80
Figura 29: Temperaturas do arquivo climático INMET2016 para Porto Alegre.	81
Figura 30: Detalhe da carta geológica de Porto Alegre (SH. 22).....	82

Figura 31: Temperaturas do solo pelo arquivo climático INMET2016 para Porto Alegre.	85
Figura 32: Carta bioclimática adaptada da NBR 15220.	86
Figura 33: Comparação de definições de conforto térmico para o clima de Porto Alegre.	87
Figura 34: Conceito original do PCA para o protótipo na UFRGS.	91
Figura 35: Planta-baixa e corte básicos do PCA.	92
Figura 36: Ambiente para modelagem e simulação da edificação.	94
Figura 37: Modelagem da edificação em zonas térmicas.	95
Figura 38: Modelo volumétrico da edificação como visto pelo SketchUp.	96
Figura 39: Modelo simulado calibrado e temperaturas medidas: semana de verão.	97
Figura 40: Modelo simulado calibrado e temperaturas medidas: semana de inverno.	97
Figura 41: Desempenho térmico da edificação não-condicionada em janeiro.	98
Figura 42: Desempenho térmico da edificação não-condicionada em agosto.	99
Figura 43: Cargas de energia para o conforto térmico da edificação.	101
Figura 44: Temperaturas da edificação sob condicionamento térmico em janeiro.	101
Figura 45: Temperaturas da edificação sob condicionamento térmico em agosto.	102
Figura 46: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – ASHP.	108
Figura 47: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP vertical.	114
Figura 48: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP horizontal. ...	116
Figura 49: Layout conceitual para diferentes GCHPs no PCA.	118
Figura 50: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – diferentes HPs.	120
Figura 51: Impacto da definição de conforto térmico – GCHPh.	130
Figura 52: Roteiro de projeto e avaliação técnico-econômica.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Bases filosóficas de três grandes perspectivas de pesquisa.	31
Tabela 2: Resultados de uma pesquisa de Ciência do Projeto.	33
Tabela 3: Eficiências típicas para diferentes dispositivos de condicionamento térmico.	46
Tabela 4: Crescimento global do uso de GSHPs até 2015.	55
Tabela 5: Países líderes no uso de bombas de calor geotérmicas em 2004.	56
Tabela 6: Países líderes no uso de bombas de calor geotérmicas em 2015.	56
Tabela 7: Comparação entre ASHPs e diferentes GSHPs.	59
Tabela 8: Comparação dos atuais modelos de simulação para poços de GCHPs.	67
Tabela 9: Fator de curto-circuito para tubos em U em aplicações padrão.	72
Tabela 10: Arranjos e bombas de calor recomendados para GCHP residenciais.	73
Tabela 11: Comprimentos recomendados de escavação por kW para GCHPs residenciais. ...	74
Tabela 12: Correção de valores da Tabela 11 em função da condutividade do solo.	74
Tabela 13: Valores de referência e os adotados para as propriedades do solo raso.	84
Tabela 14: Valores de referência e os adotados para as propriedades do solo profundo.	84
Tabela 15: Período anual em conforto térmico para Porto Alegre.	88
Tabela 16: Padrão de ocupação.	89
Tabela 17: Conforto térmico do PCA sem condicionamento de ar (mai 2003 – mai 2004). ...	92
Tabela 18: Impacto dos ganhos internos sobre o conforto térmico não-condicionado.	99
Tabela 19: Cargas de energia para o conforto térmico da edificação.	100
Tabela 20: Modelagem do PTHP no EnergyPlus.	107
Tabela 21: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – ASHP.	108
Tabela 22: Comprimentos de escavação pelas recomendações simplificadas da ASHRAE.	110
Tabela 23: Parâmetros para o projeto de um sistema GCHP vertical.	112
Tabela 24: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP vertical.	114
Tabela 25: Parâmetros para o projeto de um sistema GCHP horizontal.	115
Tabela 26: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP horizontal.	116
Tabela 27: Comprimentos de trincheira para o GCHP horizontal.	117
Tabela 28: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – diferentes HPs.	120
Tabela 29: Variáveis para avaliação econômica do estudo de caso – 2017.	122
Tabela 30: Análise de sensibilidade para viabilidade do caso de referência – 2017.	125

Tabela 31: Variáveis para avaliação econômica do estudo de caso – 2018.	127
Tabela 32: Análise de sensibilidade para viabilidade do caso de referência – 2018.....	128
Tabela 33: Impacto da definição de conforto térmico.	129
Tabela 34: Impacto das propriedades térmicas do solo.	131

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
α_g	Difusividade térmica do solo, m ² /d
β_0, β_1	Coefficientes relacionados à posição dos tubos no poço, -
c_p	Calor específico, J/kg.K
d_b	Diâmetro do poço, m
d_i, d_o	Diâmetros interior e exterior do tubo, m
COP	Coefficiente de desempenho, -
EER	Razão de eficiência energética, BTU/Wh
F	Fração de operação, -
F_o	Número de Fourier, -
F_{sc}	Fator de perda de calor pelo curto-circuito entre os tubos no poço, -
G	Fator-G – Resposta adimensional de temperatura a pulsos de calor, -
h	Entalpia específica, J/kg
Inv_{AC}	Custo de investimento total de um sistema de A/C, R\$
Inv_{GHE}	Custo de investimento total de um sistema de GCHP, R\$
i_r	Taxa de juros real, -
k_g	Condutividade térmica do solo, W/m.K
L	Comprimento do poço, m
$LMTD$	Média logarítmica entre os diferenciais de temperatura de dois fluidos, °C, K
$Loss$	Perda econômica devida à instalação de um sistema de GCHP em vez de um A/C, R\$
\dot{M}	Fluxo mássico no poço, kg/s
\dot{m}	Fluxo mássico, kg/s
Op_{AC}	Custo operacional mensal de um sistema de A/C, R\$
Op_{GHE}	Custo operacional mensal de um sistema de GCHP, R\$
P_c	Capacidade total da bomba de calor à temperatura de projeto $T_{wi,c}$, W
P_h	Capacidade total da bomba de calor à temperatura de projeto $T_{wi,h}$, W
PLF_m	Fator de utilização de carga durante o mês de projeto, -
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor da bomba de calor, W
Q_c	Calor cedido pelo condensador, J
Q_e	Calor absorvido pelo evaporador, J
q	Taxa de transferência de calor pelo circuito enterrado, W

q_a	Taxa de transferência de calor líquida anual com o solo, W
q_c	Carga de resfriamento de projeto da edificação para o pulso de curta duração, W
q_h	Carga de aquecimento de projeto da edificação para o pulso de curta duração, W
q_L	Taxa de aquecimento por comprimento, W/m
R	Resistência térmica, m.K/W
R_b	Resistência térmica do poço, m.K/W
R_g	Resistência térmica do solo, m.K/W
R_{ga}	Resistência térmica do solo – pulso anual, m.K/W
R_{gm}	Resistência térmica do solo – pulso mensal, m.K/W
R_{gst}	Resistência térmica do solo – pulso de curta duração, m.K/W
R_{grt}	Resistência térmica do anel do poço – pulso de curta duração, m.K/W
R_p	Resistência térmica do tubo em U, m.K/W
ρ_g	Densidade do solo, kg/m ³
r	Distância radial, m
r_b	Raio do poço, m
T	Temperatura, °C, K
t	Tempo, d
T_c	Temperatura do condensador (zona quente da bomba de calor), °C, K
T_e	Temperatura do evaporador (zona fria da bomba de calor), °C, K
T_f	Temperatura do fluido de trabalho dentro do circuito enterrado, °C, K
T_g	Temperatura do solo, °C, K
T_p	Alteração de temperatura a longo prazo devida ao desequilíbrio de cargas térmicas, °C
T_{source}	Temperatura da fonte, °C, K
T_{set}	Temperatura de ajuste para a edificação, °C, K
$T_{wi,c}$	Temperatura do líquido entrando na bomba de calor (ELT_c) durante o resfriamento, °C
$T_{wo,c}$	Temperatura do líquido saindo da bomba de calor (LLT_c) durante o resfriamento, °C
$T_{wi,h}$	Temperatura do líquido entrando na bomba de calor (ELT_h) durante o aquecimento, °C
$T_{wo,h}$	Temperatura do líquido saindo da bomba de calor (LLT_h) durante o aquecimento, °C
U	Coefficiente global de transferência de calor, W/m ² .K
V	Vazão, L/h
W	Trabalho, J
W_c	Potência da bomba de calor à carga de resfriamento de projeto, W
W_h	Potência da bomba de calor à carga de aquecimento de projeto, W
z	Profundidade do poço, m

LISTA DE ABREVIATURAS

A/C	Aparelho de ar condicionado
ASHP	<i>Air source heat pump</i> (bomba de calor de fonte de ar)
BES	<i>Building energy simulator</i> (simulador energético de edificações)
DX	<i>Direct Exchange [system]</i> (sistema de troca direta de calor)
EAHX	<i>Earth-air heat exchanger</i> (trocador de calor terra-ar)
EES	<i>Earth energy system</i> (bomba de calor geotérmica)
ETHE	<i>Earth-tube heat exchanger</i> (trocador de calor de tubos enterrados)
GCHP	<i>Ground-coupled heat pump</i> (GSHP de circuito fechado)
GHE	<i>Ground heat exchanger</i> (trocador de calor geotérmico)
GHP	<i>Ground heat pump</i> (bomba de calor geotérmica)
GSHP	<i>Ground source heat pump</i> (bomba de calor geotérmica)
GSS	<i>Ground source system</i> (bomba de calor geotérmica)
GWHP	<i>Ground water heat pump</i> (bomba de calor de águas subterrâneas)
HDPE	<i>High density polyethylene</i> (polietileno de alta densidade)
HGCHP	<i>Hybrid ground coupled heat pump</i> (GCHP híbrido)
HP	<i>Heat pump</i> (bomba de calor)
HVAC	<i>Heating, ventilation and air conditioning</i> (aquecimento, ventilação e ar condicionado)
NZEB	<i>Net zero energy building</i> (edificação autossuficiente em energia)
PTHP	<i>Packaged terminal heat pump</i> (unidade de bomba de calor compacta)
RHC	<i>Radiant heating and cooling</i> (aquecimento e resfriamento por radiação)
SWHP	<i>Surface water heat pump</i> (bomba de calor de águas superficiais)
TMY	<i>Typical meteorological year</i> (ano [sintético] típico para os dados climáticos)
TRY	<i>Test reference year</i> (ano de referência para os dados climáticos)

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i>
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, INMET
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica, Rio Grande do Sul
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DOE	<i>U.S. Department of Energy</i>
EPW	<i>EnergyPlus Weather File</i>
IGSHPA	<i>International Ground-Source Heat Pump Association</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética de Edificações, UFSC
NBR	Norma Brasileira, ABNT
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration, NASA</i>
NORIE	Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, UFRGS
PCA	Protótipo Casa Alvorada, UFRGS
RTQ	Regulamento Técnico de Qualidade, INMETRO
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Desde a Revolução Industrial, o apetite por mais e mais energia nunca parou de crescer, estimulado por um ciclo ininterrupto de produção e consumo. É possível mesmo afirmar que, por trás da maioria dos conflitos desde o séc. XX, está a corrida pelas fontes cada vez mais preciosas de energia, especialmente petróleo, mas também carvão e gás – história extensivamente discutida pelo Daniel Yergin em *O Petróleo* (2010). Como diz o mesmo autor: “As duas grandes guerras demonstraram de forma duríssima que a energia tem importância estratégica, particularmente o petróleo” (YERGIN, 2010, p. 899). Enquanto fontes renováveis de energia podem oferecer uma alternativa no futuro, como diz Roaf (2009), os custos de energia continuarão aumentando até que um equilíbrio entre oferta e demanda seja atingido, e eles provavelmente jamais voltarão a ser tão baixos como eram na primeira metade do séc. XX.

O condicionamento térmico de espaços industriais, comerciais e residenciais por si só já é responsável por cerca de 40 a 50% do consumo total de energia nos EUA e Europa (HUGHES, 2008; BAYER *et al.*, 2012; IEA, 2017) e, à medida em que o crescimento econômico possibilita padrões de vida mais elevados, é esperado que esta demanda aumente também (e especialmente) nos países em desenvolvimento (KHARSEH, 2012). No Brasil, a demanda de energia por aquecimento é baixa, exceto por períodos mais curtos na região sul. Por outro lado, a demanda por resfriamento é considerável e crescente (SHAH *et al.*, 2015; SORGATO *et al.*, 2016), agravada por baixas exigências de eficiência energética dos aparelhos e das edificações (BODACH; HAMHABER, 2010; SHORES, 2017).

Mudanças climáticas também podem afetar as demandas de condicionamento térmico. De acordo com especialistas da WMO (*World Meteorological Organization*), o planeta se tornou 0,8 °C mais quente ao longo do séc. XX, com a maioria deste aquecimento apenas nas últimas décadas (IPCC, 2007). Quinze dos dezesseis anos mais quentes desde o início das medições ocorreram depois do ano 2000 e, de acordo com a NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), 2016 foi o ano mais quente já registrado (NOAA, 2017), Figura

1. Na América do Sul, o continente como um todo teve seu segundo verão mais quente em 2016, atrás apenas do verão de 2015. No Brasil, em conjunção com o fenômeno do El Niño, o verão de 2015-2016 foi o mais quente, com temperaturas 4 °C acima da média e facilmente superando os 40 °C em várias cidades (PEGORIM, 2015).

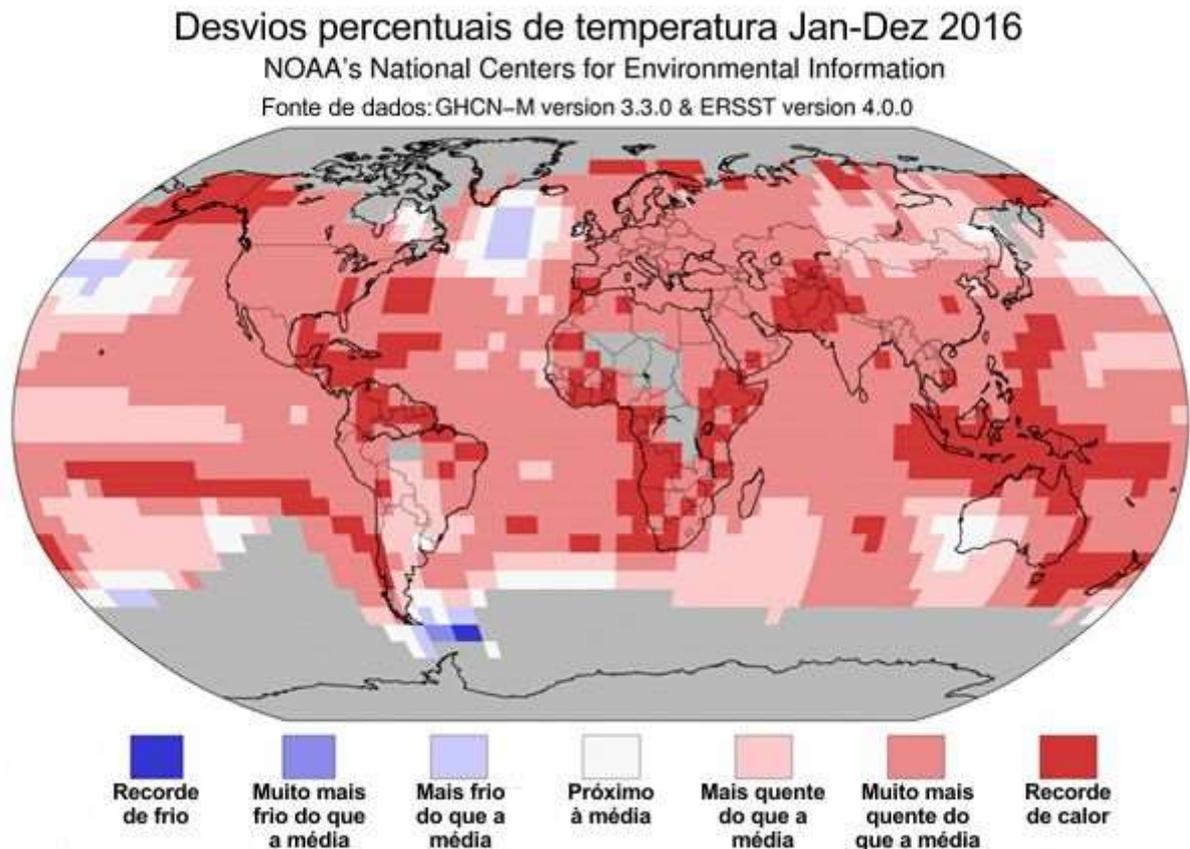


Figura 1: Desvios da temperatura média terrestre e marítima para Jan-Dez 2016.
 (Áreas cinzas representam dados indisponíveis)

(Adaptado de: NOAA, 2017)

Neste cenário, o condicionamento térmico de edificações deixa de ser simplesmente uma questão de conforto e passa a ser uma de saúde pública. Conforme especialistas do Instituto Pereira Passos (BBC, 2015, p. 1):

[...] o maior problema do calor para a saúde não é o pico de temperatura mais elevada, mesmo que acima dos 40°C. O grande risco é quando, ao longo de pelo menos três dias consecutivos, a temperatura máxima passa dos 36°C e a mínima não cai abaixo dos 21°C. Quando isso ocorre, o corpo não consegue se resfriar e tende ao superaquecimento, o que pode levar a paradas cardíacas e derrames.

Como indicado pelos registros climáticos do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) (INMET, 2016), esta é uma realidade que está se tornando comum no Brasil. No caso do Rio Grande do Sul, há ainda um outro aspecto em particular a ser considerado. Como visto na Figura 2, em 2016, o verão foi mais quente que o usual, assim como no resto do Brasil; no entanto, o inverno, ao contrário, foi mais frio. De acordo com o Professor de Climatologia da UFRGS, Francisco Aquino, o aquecimento global acentuou o contraste entre a região amazônica e a Antártica e, devido à posição do Estado entre as massas de ar quente do primeiro e de ar frio do segundo, a diferença entre as estações se torna mais intensa (SENGE, 2016). Desta maneira, além de causar mais chuvas e tempestades, as temperaturas mais extremas podem elevar as demandas de condicionamento térmico em todas as estações.

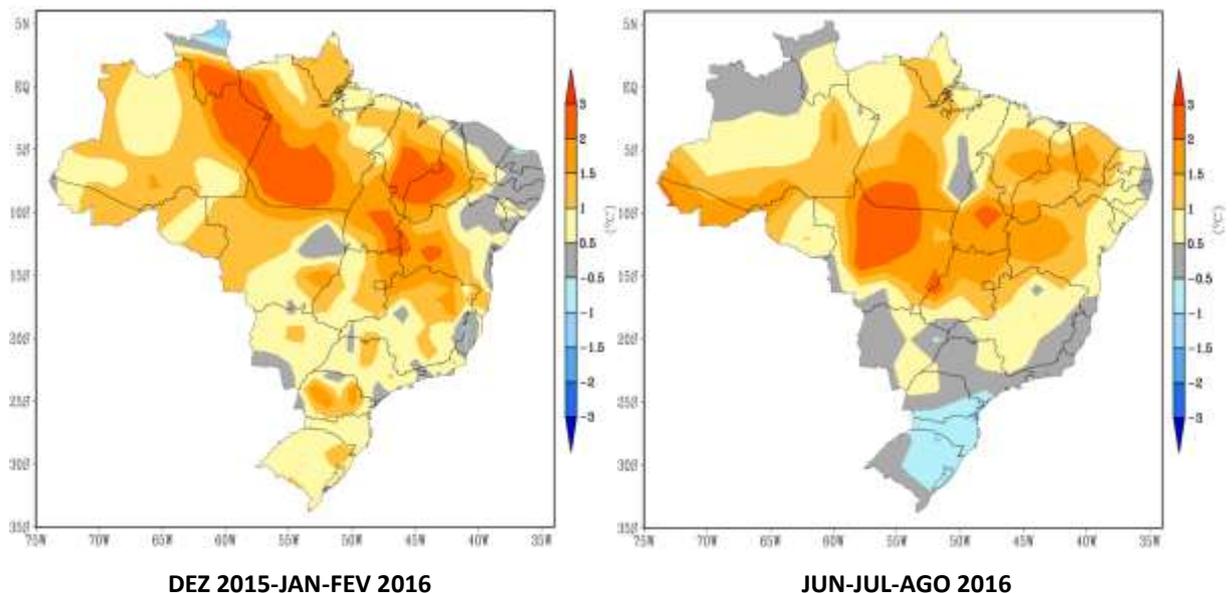


Figura 2: Anomalias das temperaturas médias para o verão e inverno no Brasil em 2016. (Referentes ao período de 1961-2010)

(Fonte: INMET, 2017)

Seja para aquecimento ou resfriamento, a fim de se reduzir o consumo energético de edificações, uma das primeiras medidas deveria ser o uso de soluções passivas, tais como melhorias no isolamento, aquecimento solar e ventilação natural. Enquanto uma combinação de isolamento e aquecimento solar pode ser suficiente para a maioria das necessidades de aquecimento no sul do Brasil, a ventilação por si só não pode reduzir a temperatura de um espaço abaixo da temperatura de seu ambiente externo (ROAF, 2013) – a qual, como mencionado, pode ser bem elevada em certas ocasiões.

Neste panorama, a reação natural dos usuários tem sido o maior uso do ar condicionado. Conforme Ilanez Pereira, presidente da Air ClimaClean (THE SÃO PAULO TIMES, 2015, p. 1): “A compra e o consumo de ar condicionados e aparelhos de ventilação tem crescido em um ritmo alucinante, [mas] felizmente o brasileiro hoje tem acesso a esse bem de consumo.”

Esta contestação, porém, ignora o conseqüente aumento dos preços de energia elétrica e a ameaça que o crescimento do consumo representa à matriz energética brasileira. Por ser alimentada principalmente por hidroelétricas, ela é especialmente vulnerável a mudanças climáticas, sofrendo com baixos níveis nos reservatórios durante secas mais longas. Assim, exatamente nos períodos de maior demanda de energia elétrica devido ao maior uso de ar condicionados, a possibilidade de oferta é menor e o risco de blecautes, maior. É bom lembrar o que aconteceu na Europa durante a onda de calor de 2003, quando mais 30 mil mortes foram atribuídas às altas temperaturas (ROAF, 2009). Além de não estarem devidamente preparados para esta situação atípica, o problema se agravou quando várias usinas nucleares pararam de operar devido a superaquecimento nos resfriadores de vapor (ROAF, 2009).

À medida que economias crescem, particularmente em países de clima quente, a demanda por resfriamento se torna uma importante consumidora de eletricidade, com projeções futuras elevadas para países como Índia, Indonésia, Brasil e México. Na China, o crescimento das vendas de aparelhos de ar condicionado (para aquecimento e resfriamento) foi tão rápido que a sua penetração no mercado já é de mais de 100% – ou seja, mais de um aparelho por família (MOONEY; DENNIS, 2016). Embora proteger a população do frio e do calor intenso seja essencial para a sua saúde e bem-estar, esta mudança tem como consequência um imenso consumo de energia e, potencialmente, também de uma imensa emissão de carbono. A nível global, um relatório do *Lawrence Berkeley National Laboratory* projeta uma instalação de 700 milhões de aparelhos de ar condicionado até 2030 e de 1,6 bilhão até 2050 (SHAH *et al.*, 2015). Em termos do uso de eletricidade e emissão de gases de efeito estufa, isto é como adicionar diversos novos países ao mundo.

É neste contexto que desviamos nossa atenção para um ambiente onde a temperatura é naturalmente muito mais estável e favorável (frequentemente já em uma faixa de conforto), o solo. Apenas alguns metros abaixo da superfície, a variação sazonal começa a se reduzir graças à inércia térmica do solo e sua capacidade calorífica (HANOVA; DOWLATABADI, 2007). A uma profundidade ao redor de 10 m, a temperatura é quase constante ao longo do ano, sendo aproximadamente igual à temperatura média anual local (GLASSLEY, 2015). Desta forma, o solo age como uma fonte natural de calor durante o inverno e como um dreno no verão,

permitindo eficiências de troca térmica muito maiores do que em aparelhos de ar condicionado convencionais, tanto para aquecimento, como para resfriamento (CASASSO; SETHI, 2014). Este é o principal fator ao se considerar o solo como meio de troca de calor em vez do ar. Se águas subterrâneas estiverem disponíveis, a troca é ainda mais facilitada (CAPOZZA *et al.*, 2013; SCHIBUOLA *et al.*, 2013).

Os equipamentos baseados neste princípio são genericamente chamados de “trocadores de calor geotérmicos”, ou *ground heat exchangers* (GHE), cujo subtipo mais usado e eficiente é a “bomba de calor geotérmica”, ou *ground source heat pump* (GSHP) (ASHRAE, 2011). GSHPs funcionam de forma similar aos ar condicionados convencionais (*air source heat pumps*, ASHPs), mas em vez de trocarem calor com o ar, possuem um grande circuito enterrado para realizar esta operação com o solo, como ilustrado na Figura 3.

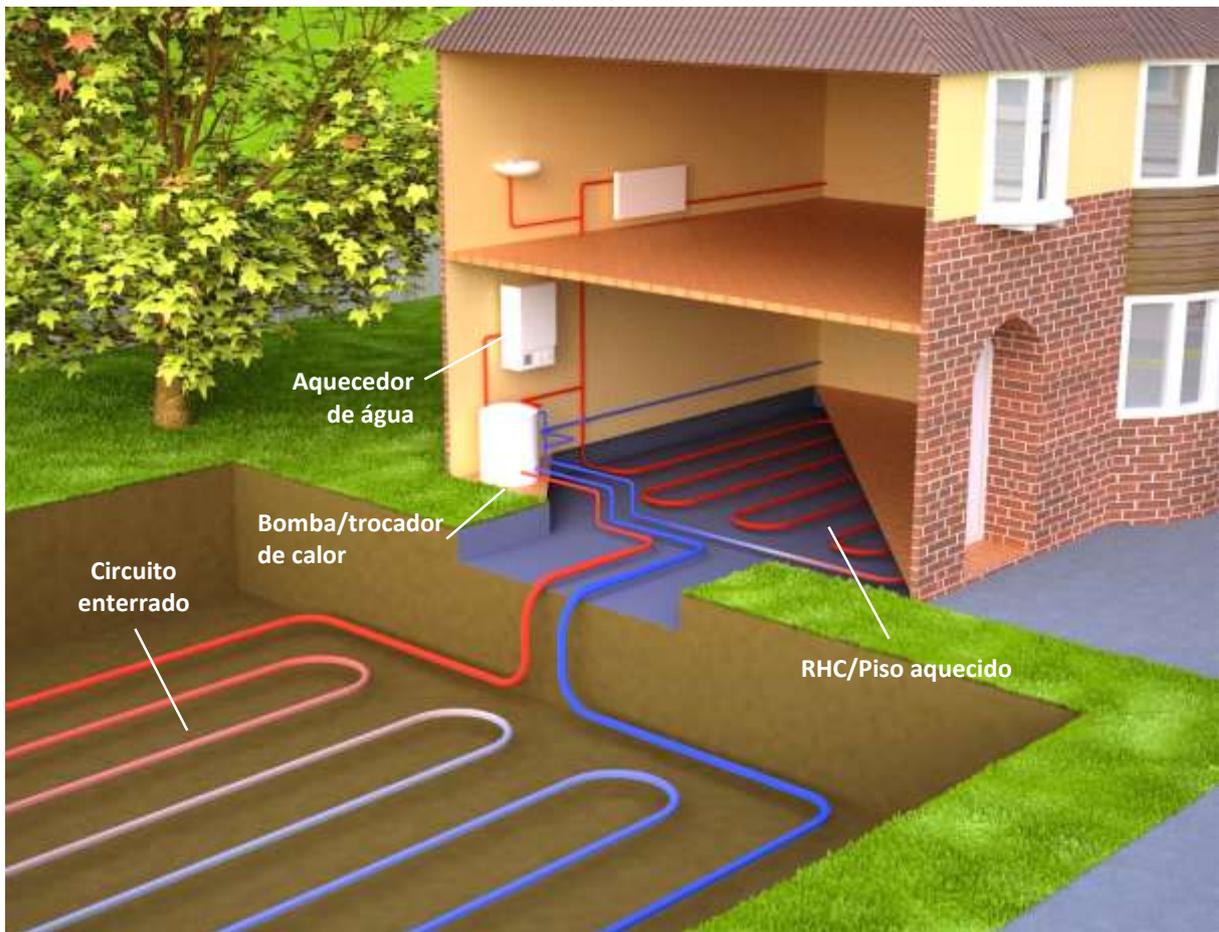


Figura 3: Esquema típico de um GSHP.

(Adaptado de: CFSOLAR, 2017)

Por apresentar eficiências térmicas muito maiores do que ASHPs e outros sistemas de condicionamento térmico, as GSHPs têm um alto potencial para reduzir o consumo de energia, os custos de operação e as emissões de CO₂, e por isso já estão se difundindo rapidamente ao redor da Europa, América do Norte e China (CURTIS *et al.*, 2005; LUND; BOYD, 2016). Ambientalmente, GSHPs não geram nenhuma emissão local – a eletricidade utilizada pelas bombas e compressores é a única fonte potencial de emissões (SANER *et al.*, 2010). Estimativas recentes afirmam que a troca de aparelhos de ar condicionado convencionais e de aquecedores a gás e elétricos para GSHPs poderia reduzir entre 40 a 80% as emissões de CO₂ devidas ao condicionamento térmico, dependendo em como a eletricidade é gerada (SANER *et al.*, 2010; IEA, 2017). Um relatório da IEA (*International Energy Agency*) de 2017, inclusive, inclui bombas de calor como as GSHP entre uma das tecnologias-chave para se atingir o cenário de elevação da temperatura média mundial até 2060 abaixo de 2 °C (IEA, 2017).

Apesar das diversas vantagens das GSHPs, elas ainda possuem limitações, sendo a principal o custo de investimento mais elevado (WU, 2009). Além disso, sua eficiência depende fortemente do clima: em áreas de baixa sazonalidade (como nos trópicos), ela é apenas um pouco maior do que a de ASHPs, dificilmente justificando o maior investimento (WU, 2009; ASHRAE, 2011). O tipo de tecnologia a ser empregada, o dimensionamento, a eficiência e o retorno econômico dependem bastante de (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014):

- Custos locais de energia elétrica e combustível;
- Acesso a tecnologias (equipamentos e materiais necessários e profissionais com conhecimento e experiência para instalação e comissionamento do sistema);
- Clima (amplitude térmica diária e anual, cargas térmicas e picos de demanda para aquecimento e/ou resfriamento);
- Características do solo (condutividade térmica, disponibilidade de água subterrânea ou superficial);
- Otimização do projeto e integração com outros sistemas (foco nas necessidades locais, cuidado para evitar saturação energética do solo).

Segundo Hanova e Dowlatabadi (2007), a principal variável a afetar a viabilidade econômica a longo prazo é o custo da energia. Porém, com o aumento progressivo deste custo, o custo operacional de GSHPs para o resfriamento já é mais baixo do que o de qualquer outra tecnologia competidora, enquanto que, para aquecimento, aquecedores a gás natural são os únicos a competir em custo (HANOVA; DOWLATABADI, 2007).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Conforme apresentado, GSHPs são bastante atrativos pela economia de energia proporcionada, mas o desempenho real e a sua viabilidade técnica e econômica dependem muito de fatores geográficos e econômicos.

Durante a maioria de sua história, GSHPs foram usados principalmente como aquecedores em áreas com um clima frio mais severo, como no norte da Europa, nos Estados Unidos e no Canadá (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014). Uma vez que o ganho em se usar o solo em vez do ar como fonte de calor aumenta com a sazonalidade (ROAF, 2013), poderia se concluir então que esta tecnologia é mais viável economicamente em maiores latitudes e menos em regiões tropicais, como a maioria do Brasil. Entretanto, a eficiência térmica de GSHPs é, na verdade, maior em climas com verões e invernos mais balanceados – o que é demonstrado, por exemplo, no estudo de Morrone *et al.* (2014) comparando o desempenho dos mesmos aparelhos no Norte (mais frio) e no Sul (mais ameno) da Itália. Em Chipre, outro país onde GSHPs ainda são incomuns, o estudo de Florides *et al.* (2011) indicou eficiências potenciais maiores do que para a Europa do Norte e Central, pelo balanceamento gerado pelas cargas de resfriamento.

Seguindo estas evidências, o Rio Grande do Sul, como o Estado brasileiro com a maior variação sazonal de temperaturas (INMET, 2016) e necessidades comuns tanto de aquecimento como de resfriamento (ABNT, 2013), apresenta-se como um bom candidato ao uso de GSHPs. Aliás, é provável que grande parte da região sul da América do Sul ofereça um excelente desempenho, mas até o momento desta pesquisa, apenas umas poucas aplicações práticas eram conhecidas em todo o continente, todas localizadas no Chile (LUND, 2016). Conforme Muñoz *et al.* (2015), a limitação atual do uso de GSHPs na região é devida não apenas ao seu custo inicial elevado, mas especialmente à falta de estudos locais quanto ao seu comportamento e que forneçam dados mais confiáveis para o dimensionamento. De acordo com os mesmos autores, é possível que o próprio custo de escavação elevado também seja consequência de circuitos sobredimensionados devido à insegurança nos dados (MUÑOZ *et al.*, 2015).

Entretanto, como o desempenho de uma GSHP depende de uma série de variáveis geográficas, os resultados obtidos nos países onde atualmente a tecnologia prospera não podem ser automaticamente considerados válidos em qualquer cenário. Para a implantação de uma GSHP, as informações sobre o clima e as características do solo são essenciais, mas podem

estar indisponíveis, e a aquisição *in situ* de um perfil de temperaturas do solo pode ser custosa (ASHRAE, 2011). Como demonstrado em Casasso e Sethi (2014), os próprios parâmetros de projeto também podem ter um grande impacto no desempenho final, como no balanço de investimentos entre a bomba de calor e o circuito enterrado. Nos Estados Unidos, os líderes mundiais na tecnologia (LUND, 2016), já existe todo um corpo de agências e pesquisadores fornecendo suporte e dados para facilitar o projeto e a estimativa de custos e de retorno, baseada em décadas de levantamentos de campo (ASHRAE, 2011). Alguns países da Europa também oferecem suporte (como em IDAE, 2012) e normas quanto ao projeto e instalação de GSHPs, como a VDI 4640-2 alemã (VDI, 2001).

Um suporte local similar, com estudos aprofundados das características e dos perfis térmicos do solo, assim como do comportamento e do potencial de GSHPs nas condições climáticas brasileiras poderia facilitar a inserção desta tecnologia no Brasil (NETO; VOLTANI, 2013), porém estudos assim no País e na América do Sul ainda são incipientes. O primeiro poço para teste térmicos da América Latina foi instalado apenas em 2004, no Chile (ROTH *et al.*, 2004) e, até o momento deste trabalho, raros artigos de pesquisadores da região sobre GSHPs puderam ser encontrados em bases de dados científicas como o ScienceDirect. Pesquisas sobre condicionamento geotérmico no Brasil existem, como as de Silva e Neto (2010), Vaz (2011) e Brum *et al.* (2017), mas em geral se referem a trocadores de calor terra-ar (*earth-to-air heat exchangers*, ou EAHXs), equipamentos mais simples e baratos, porém longe de atingir os mesmos níveis de capacidade e eficiência.

A disseminação de novas tecnologias depende muito de ações políticas e de mais investimentos em pesquisa e desenvolvimento (IEA, 2017). No caso de GSHPs, Hughes (2008) afirma que, considerando-se o seu potencial em reduzir o consumo de energia, esta tecnologia ainda tem recebido muito pouca atenção pública (especialmente se comparada a de outras energias renováveis como solar e eólica). Devido a este fator e ao seu alto custo inicial (o que também é uma consequência da falta de investimento), Hughes (2008) conclui que a ação mais importante ainda é reunir dados concretos, independentes e estatisticamente válidos quanto aos seus custos e benefícios. Em outras palavras, não basta apenas saber que GSHPs são alternativas eficientes para aquecimento e resfriamento, é necessário saber o quanto elas podem proporcionar em cada situação e quando o ganho justifica o investimento. Estudos de viabilidade técnica e econômica são, assim, o passo inicial para estimular o devido interesse comercial (e mesmo científico) na tecnologia.

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

Bombas de calor geotérmicas são uma forma de energia renovável relativamente nova, ainda pouco exploradas em comparação a outras formas de energia, mas comprovadamente com um grande potencial para reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono. No entanto, ainda possuem um custo inicial mais elevado que a maioria dos concorrentes convencionais para o aquecimento e resfriamento de edificações e sua eficiência possui uma forte dependência geográfica. Por este motivo, os resultados obtidos em uma região não podem ser diretamente usados como garantia da viabilidade em outras situações.

O Rio Grande do Sul, como o Estado brasileiro com a maior sazonalidade, oferece as melhores condições climáticas para que a tecnologia apresente um bom desempenho, mas qual a eficiência que realmente pode ser obtida? Comparada às alternativas mais eficientes atualmente disponíveis no Estado, o retorno energético e econômico é suficiente para justificar os investimentos necessários em pesquisa e implantação?

1.4 OBJETIVOS

1. Estimar a viabilidade de GSHPs frente a ASHPs, os sistemas de condicionamento térmico mais eficientes atualmente disponíveis, em um caso de estudo no Rio Grande do Sul.
 - 1.1. Viabilidade técnica: Estimar os níveis de eficiência que podem ser obtidos nas condições climáticas locais e a influência de variáveis como o tipo de solo e as temperaturas de operação.
 - 1.2. Viabilidade econômica: Estimar os custos de implantação e operação para pequenos consumidores (residências e pequenos comércios) e a influência da demanda energética da edificação, dos custos de energia, da inflação e da taxa de juros no retorno econômico.
 - 1.3. Analisar a sensibilidade da viabilidade frente a variações no condicionamento térmico, no consumo de energia e no tipo de solo para o caso de estudo.

2. Esquematizar um roteiro para especificação e projeto de um sistema de GSHP, desde a avaliação das demandas energéticas da edificação, a fim de auxiliar novos projetistas e avaliar a viabilidade para diferentes cenários.
3. São objetivos secundários deste trabalho, mas de potencial contribuição:
 - 3.1. Disseminação do conhecimento sobre bombas de calor geotérmicas, a fim de estimular mais pesquisas na área.
 - 3.2. Gerar um modelo computacional confiável e calibrado de um protótipo construído de uma habitação de interesse social, que possa servir de teste e ponto de partida para demais pesquisas.

1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Devido a limitações de tempo e recursos, mas também a fim de manter o foco deste trabalho na comparação de tecnologias:

- Embora o uso de águas superficiais e subterrâneas em GSHPs possa resultar em custos menores e ganhos maiores, este estudo se restringe a GCHPs, que não dependem desta disponibilidade e podem ser usados em mais localizações.
- A estimativa das demandas energéticas da edificação residencial não considera o efeito potencial da ventilação natural na redução do consumo. As simulações, contudo, consideram as demais condições do entorno, o efeito das infiltrações de ar e do sombreamento externo.
- A estimativa das demandas energéticas considera uma exigência constante de conforto térmico, mais apropriada a uma unidade residencial com presença permanente de ao menos um ocupante.
- Apesar de o Rio Grande do Sul abranger mais de uma zona bioclimática, este estudo se foca em uma para o caso de estudo.
- O estudo de viabilidade econômica não considera taxas de importação, subsídios ou outras políticas públicas na comparação de custos entre GSHPs e ASHPs.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Enquanto este primeiro capítulo introduz o problema e a ideia a ser explorada, o Capítulo 2 apresenta a metodologia desta pesquisa, alinhada dentro das ciências de projeto.

O Capítulo 3 faz uma revisão dos conceitos gerais de Geotermia e de Termodinâmica para bombas de calor, apresentando ao leitor o funcionamento, os diferentes tipos e a perspectiva de crescimento de bombas de calor geotérmicas. Em seguida, o Capítulo 4 cobre os fundamentos de projeto e de especificação para um projeto conceitual do sistema. Estes dois capítulos são a principal base teórica deste trabalho, e espera-se que, mesmo para um leigo com pouca familiaridade neste campo, esta revisão geral seja o suficiente para a sua compreensão.

Os Capítulos 5 e 6 cobrem as etapas de projeto em si, sendo o primeiro focado no levantamento dos dados de entrada para o projeto do sistema de condicionamento térmico e, o segundo, no dimensionamento e nas estimativas de custos e desempenho. O Capítulo 7 avalia a viabilidade do sistema de GSHP, sua sensibilidade em relação às principais variáveis de projeto e apresenta um roteiro de avaliação para novos casos, desenvolvido durante o trabalho.

O Capítulo 8, por fim, resume as conclusões obtidas e estabelece algumas considerações para investigações futuras no campo.

2 METODOLOGIA

2.1 POSICIONAMENTO DA PESQUISA

O estudo do potencial de novas tecnologias está dentro da área de conhecimento dos objetos artificiais, especificamente projetados para atingir certos objetivos. Esta “ciência do artificial”, como define Simon (1996), é o que é conhecido como “ciência do projeto”.

Ciências de projeto possuem bases filosóficas diferentes das ciências exatas (em geral positivistas) e sociais (interpretativas), com um enfoque no processo de criação e na funcionalidade (VAISHNAVI; KUECHLER, 2007), como representado na Tabela 1. Apesar deste enfoque, conforme Vaishnavi & Kuechler (2007), pesquisas em ciência do projeto se diferenciam de simples “projetos do estado-da-arte” porque produzem novos conhecimentos com valor para uma comunidade. Conforme os mesmos autores, na maioria dos projetos industriais e comerciais, busca-se o quanto possível minimizar o risco valendo-se de produtos e técnicas já conhecidas, o que resulta em pouco aprendizado; nas ciências do projeto, ao contrário, busca-se avançar além do que é conhecido e não se deve fugir do risco intelectual.

Tabela 1: Bases filosóficas de três grandes perspectivas de pesquisa.

(Fonte: VAISHNAVI; KUECHLER, 2007)

Crença básica	Perspectiva de pesquisa		
	Positivista	Interpretativa	De projeto
Ontologia (natureza da realidade)	Uma única realidade, passível de ser conhecida, probabilística	Múltiplas realidades, socialmente construídas	Estados de mundo alternativos múltiplos, contextualmente situados, habilitados sócio-tecnologicamente
Epistemologia (natureza do conhecimento)	Objetiva, não-passional, observador imparcial	Subjetiva: valores e conhecimentos afetados pela interação do observador	Conhecimento através do saber; conhecimento objetivamente restringido dentro de um contexto; circunscrição iterativa revela o significado
Metodologia	Observação; quantitativa, estatística	Participação; qualitativa, hermenêutica, dialética	Desenvolvimentista; mede impactos artificiais no sistema compositivo
Axiologia (o que tem valor)	Verdade: universal e linda; predição	Compreensão: situada; prescrição	Controle, criação, aprimoramento e compreensão

Epistemologicamente, observa-se que, nas ciências do projeto, a produção de conhecimento deriva principalmente de circunscrição iterativa (em termos leigos, do aprendizado de quando as coisas funcionam ou não), a qual se obtém apenas durante o processo de um projeto (VAISHNAVI; KUECHLER, 2007). A cada problema resolvido, o conhecimento acumulado é utilizado para resolver novos problemas até que uma limitação (ou restrição) seja atingida e este conhecimento seja aprimorado. Takeda (1990) elabora este “aprendizado pela ação” como um ciclo geral de projeto, como na Figura 1.

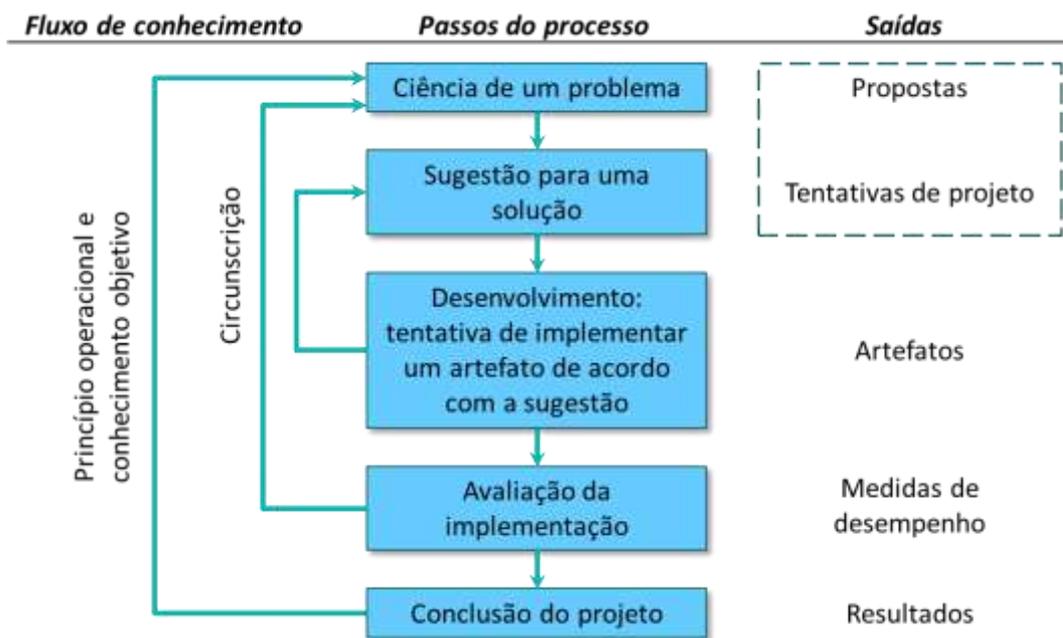


Figura 4: Metodologia geral de uma pesquisa em ciência do projeto.

(Adaptado de: TAKEDA, 1990; VAISHNAVI; KUECHLER, 2007)

O estudo e avaliação de viabilidade deste trabalho procurou seguir esta metodologia de aprendizado. Em vez de buscar conclusões apenas pela observação de casos existentes da implantação de GSHPs, este trabalho se estruturou ao redor da elaboração do projeto para um caso de estudo. Neste tipo de pesquisa, a investigação se deu por etapas, as quais geram resultados intermediários que interferem no processo, geram novos problemas a serem solucionados e orientam os passos seguintes da pesquisa. Os resultados obtidos foram então explorados para se obter conclusões aplicáveis a um contexto mais amplo e de maior relevância prática e científica.

Estudos dentro da ciência do projeto podem gerar diferentes tipos de resultados. De acordo com March e Smith (1995), estes podem ser de quatro tipos em uma escala hierárquica:

Tabela 2: Resultados de uma pesquisa de Ciência do Projeto.

(Fonte: Adaptado de MARCH, SMITH, 1995)

	Saída	Descrição
1	Construtos	O vocabulário conceitual de um domínio de problemas e soluções
2	Modelos	Conjuntos de proposições ou afirmações que expressam relações entre construtos ou entre os problemas e soluções
3	Métodos	Sequências de etapas usados para se desempenhar uma tarefa, ou como manipular os construtos para se realizar a proposição de uma tarefa: conhecimento de como fazer
4	Instanciações	A operacionalização de construtos, modelos e métodos. É a realização do artefato em um ambiente.

Pode-se dizer, por estas definições, que este trabalho se constitui em uma forma de instanciação, pois seu objetivo é, acima de tudo, operacionalizar métodos existentes e adaptá-los de modo a se chegar a conclusões com efeito prático no mundo real. Mais objetivamente, ele articula métodos e práticas de aquisição de dados e de elaboração de projetos com o fim de se obter valores concretos de viabilidade em uma faixa ampla de casos.

2.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A Figura 5 esquematiza a metodologia deste trabalho. Claramente, ela é uma derivação da metodologia geral de pesquisas em ciência do projeto estabelecida por Takeda (1990), mas com os passos customizados de acordo com as necessidades da pesquisa.

O primeiro passo do ciclo, implícito nesta metodologia, é a própria definição do problema e a elaboração de um método para tentar resolvê-lo, o que corresponde à discussão do Capítulo 1 e deste próprio Capítulo. A isto se seguiu uma extensa pesquisa de literatura quanto ao funcionamento, o potencial e a teoria de projeto de bombas de calor geotérmicas, que serviu de base para a estruturação deste método e definição dos requisitos:

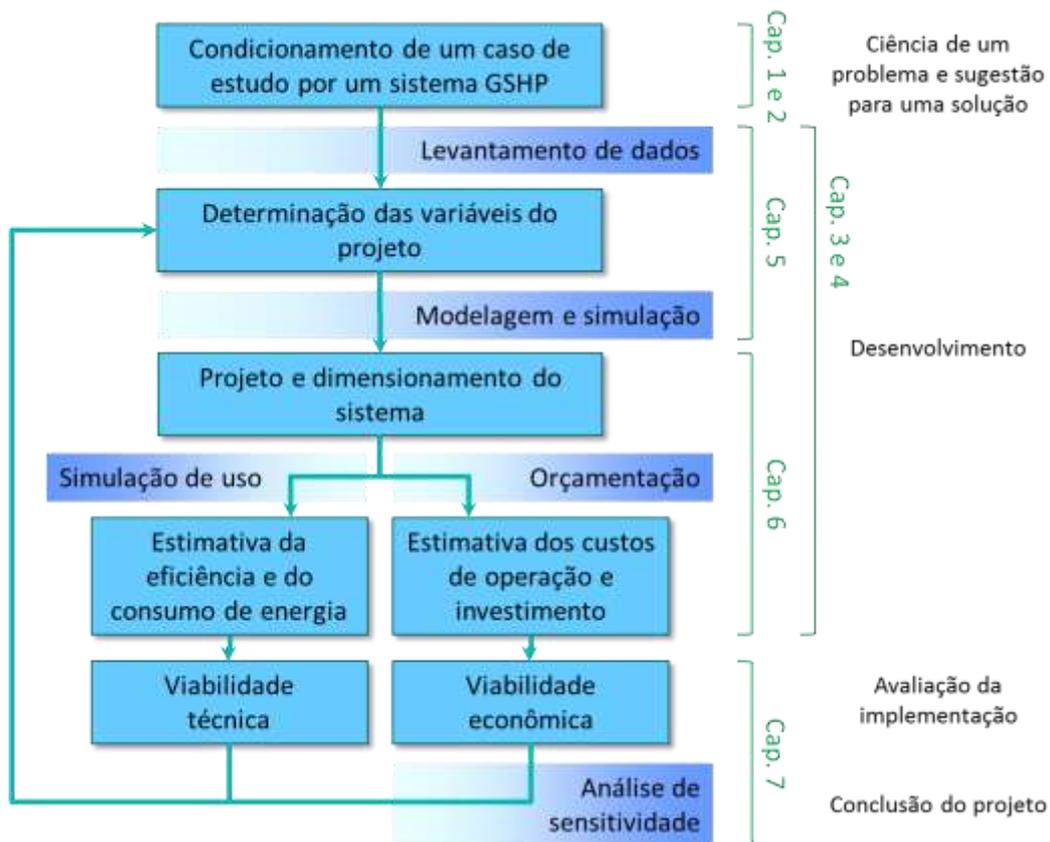


Figura 5: Metodologia de pesquisa.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

1. **Definição das condições do estudo de caso simulado:** edificação; localização; padrão de uso; sistema GSHP a ser avaliado; sistema A/C a ser usado como referência; indicadores econômicos considerados.
2. **Levantamento de dados e determinação das variáveis de projeto:** caracterização do clima e da geologia da área; definição da faixa térmica de operação; forma e materiais da edificação; tarifa de energia; custos de equipamentos e instalação; taxa de juros e inflação. A experiência do projetista demonstra que esta etapa é, frequentemente, a que mais consome tempo e a mais determinante na qualidade do projeto final. O levantamento e a seleção dos dados de entrada é, em si, parte do projeto e onde foram encontradas grande parte das limitações e aprendizados deste trabalho.
3. **Modelagem e simulação do experimento:** em um ambiente de simulação energética para obtenção das cargas térmicas e potências para dimensionamento dos sistemas de condicionamento térmico. No caso deste trabalho, a simulação foi

calibrada com medições de campo da edificação para maior precisão das estimativas.

4. **Projeto conceitual dos sistemas de condicionamento térmico:** especificação (capacidade) e dimensionamento do sistema A/C de referência e dos tipos de GSHP selecionados (um GCHP horizontal e um vertical).
5. **Estimativa do desempenho energético:** simulação do consumo anual de energia e da eficiência média obtida para cada alternativa.
6. **Estimativa dos custos de operação e investimento:** orçamentação para cada alternativa a partir dos custos levantados e do dimensionamento e do consumo energético calculados.
7. **Estudo de viabilidade técnica e econômica:** comparação dos resultados e avaliação do retorno econômico a longo prazo do uso de um sistema GSHP frente a um sistema A/C convencional.
8. **Análise de sensibilidade:** Estimativa de diferentes cenários que podem levar à viabilidade econômica e análise de como mudanças em variáveis podem influenciar os resultados finais.

A esquematização de todo o processo de projeto e avaliação em um roteiro aplicável para diferentes casos, conjuntamente com os resultados de viabilidade e as lições aprendidas formam o produto final deste trabalho.

3 CONDICIONAMENTO GEOTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

3.1 ENERGIA GEOTÉRMICA

3.1.1 Níveis de temperatura e aplicações

Em um sentido mais amplo, energia geotérmica é qualquer energia térmica dentro da crosta terrestre, seja nas rochas ou nos fluidos que preenchem seus poros (ASHRAE, 2011). Trocadores de calor geotérmicos (*geothermal heat exchangers*, GHE), que podem ser utilizados em quase qualquer parte para diversos propósitos (como o condicionamento térmico de edificações, o assunto deste trabalho), são frequentemente incompreendidos como sendo apenas para o uso de fontes quentes de calor, acessíveis apenas em alguns pontos, para mover turbinas e gerar energia elétrica. De acordo com Hughes (2008, p.5): “[*this*] *identity crisis has been detrimental to fostering awareness, understanding, and acceptance of the technology.*” Assim, o primeiro passo é diferenciar os níveis de temperatura que levam a cada tipo de uso.

Fluidos aquecidos na crosta terrestre que podem ser utilizados têm uma temperatura entre 5 a 360 °C. A partir disso, a indústria geotérmica costuma adotar a seguinte classificação por temperatura (ASHRAE, 2011):

- Temperatura alta: $T > 150$ °C
- Temperatura intermediária: 90 °C $< T < 150$ °C
- Temperatura baixa: $T < 90$ °C

Fontes de temperatura alta e intermediária são o resultado de decaimento radioativo dentro do núcleo da Terra. De fato, acredita-se que esta radiação é a fonte final de energia geotérmica e que, se fosse apenas pela radiação solar, a Terra já teria se resfriado e se tornado completamente sólida há milhares de anos (ASHRAE, 2011). Especialmente via movimento de placas e vulcanismo, mas também pela condução e convecção de águas subterrâneas, parte desta energia se concentra em alguns pontos próximo à superfície. Estas áreas são de grande valor estratégico, uma vez que a geração de energia elétrica geralmente é economicamente viável apenas para temperaturas acima de 150 °C (ASHRAE, 2011).

Áreas com temperaturas intermediárias, por sua vez, podem ser usadas para aquecimento direto, o que foi a primeira aplicação histórica deste tipo de energia. O aquecimento direto é usado principalmente para fins agrícolas, como estufas e viveiros de aquicultura, ou para fins de lazer, como piscinas e saunas. Para edificações residenciais e comerciais, o principal uso é para o aquecimento de água e ambientes. Até mesmo o uso para resfriamento de espaços é possível, através da tecnologia do ciclo de absorção de amônia em solução de água e brometo, mas estes equipamentos são raramente usados, pois apenas em algumas condições o retorno econômico se torna atrativo (RAFFERTY, 1989).

Fontes de baixa temperatura, embora menos valiosas economicamente do que as anteriores, são apropriadas para aquecimento e resfriamento indireto, via tecnologias geotérmicas rasas. Estas fontes estão disponíveis em quase toda parte e seu uso de energia é relativamente simples, uma vez que as profundidades envolvidas são normalmente baixas (WU, 2009).

3.1.2 Tecnologia geotérmica rasa

A única opção geotérmica normalmente viável para uma residência unifamiliar ou um pequeno comércio é a de tecnologias geotérmicas rasas, que incluem trocadores de calor terra-ar (*earth-to-air heat exchangers*, EAHX) e bombas de calor geotérmicas (*geothermal heat pumps*, GHP, ou *ground source heat pumps*, GSHP). GSHPs extraem calor da terra em profundidades muito baixas, comparadas aos projetos geotérmicos para geração de energia elétrica. Ao contrário destes, residências unifamiliares não necessitam de grandes diferenciais de temperatura, normalmente alcançáveis apenas em grandes profundidades.

Estritamente, porém, tecnologias geotérmicas rasas não são uma verdadeira tecnologia geotérmica, mas uma combinação entre energia geotérmica e solar. A razão para isso é que, em essência, a energia encontrada a baixas profundidades vem indiretamente da absorção de energia solar pelo solo e pela atmosfera (LOFTNESS & HAASE, 2013), como representado na Figura 6. Neste caso, o solo atua como uma fonte/dreno estável de calor graças à sua elevada capacidade calorífica e inércia térmica, apresentando uma temperatura oscilando perto da média ambiental (Figura 7). Tecnologias geotérmicas rasas são acessíveis em quase qualquer lugar, e serão as únicas consideradas neste trabalho.

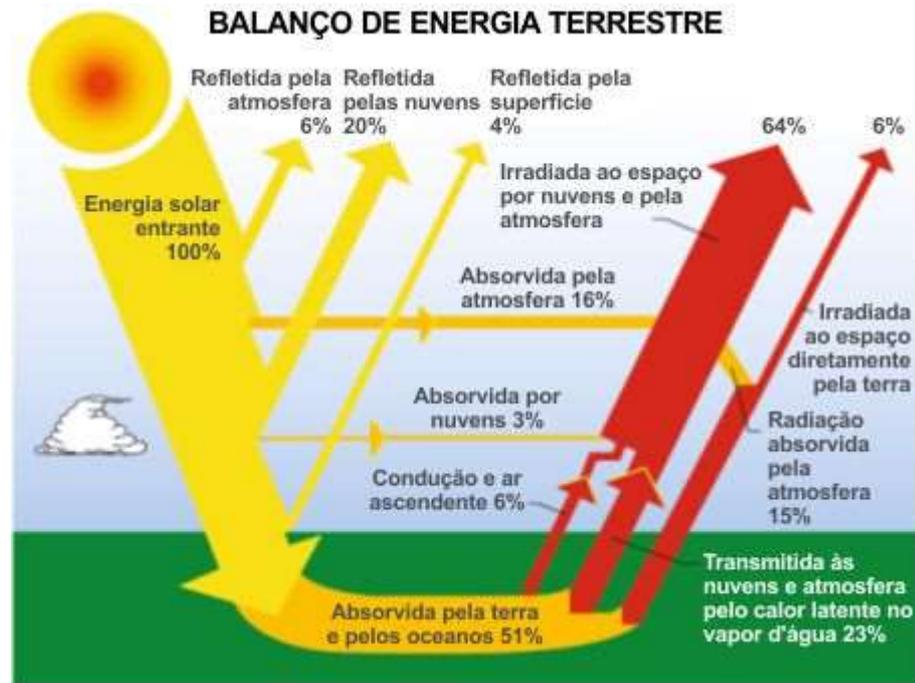


Figura 6: Radiação solar absorvida e refletida.

(Adaptado de: LOFTNESS; HAASE, 2013)

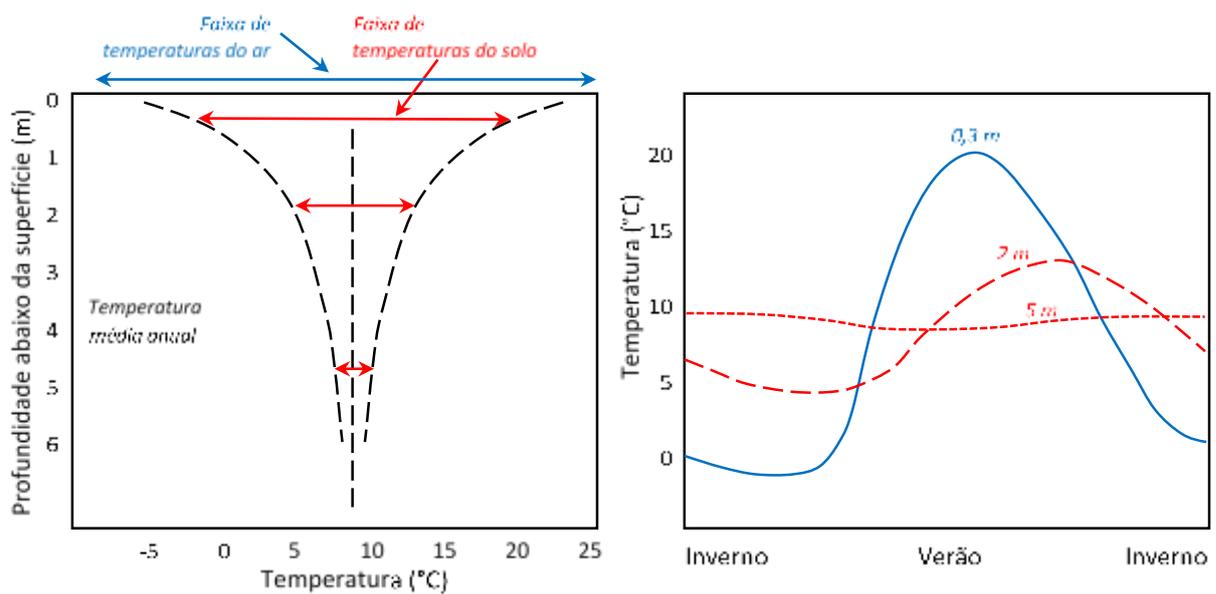


Figura 7: Dependência da profundidade na variação anual de temperaturas do solo.

(Adaptado de: HANOVA; DOWLATABADI, 2007)

3.1.3 Energia geotérmica como parte do projeto da edificação

O uso de energia geotérmica como parte do projeto da edificação, ao contrário do que possa parecer, não é novo. Por milhares de anos, muitas edificações usaram o contato direto com o solo como uma solução engenhosa para melhorar o conforto térmico.

Exatamente no Rio Grande do Sul, a área deste estudo, muitas descobertas arqueológicas demonstram que alguns dos grupos indígenas mais antigos do Brasil, os Proto-Jê, ancestrais dos Caingangues e dos Xoclengues, construíam espaços de habitação subterrâneos. Especialmente nas áreas mais altas do Rio Grande do Sul (Campos de Cima da Serra) e de Santa Catarina, mas mesmo perto do litoral e bem mais ao sul, estes grupos costumavam construir casas com profundidade média entre 2,5 a 5 m e diâmetros entre 4 a 13 m (SCHMITZ; ROGGE, 2011; D'ANGELIS; VEIGA, 2003). Esses espaços circulares eram cavados no solo ou na rocha e cobertos com um telhado de folhas suportado por uma estrutura de madeira (Figura 8). Esta estratégia permitia tanto às casas se protegerem de ventos frios e nevascas, como também tomarem proveito da inércia térmica do solo, tanto no verão como no inverno. É estimado que as primeiras casas deste tipo apareceram ao menos desde o século V e continuaram até o séc. XV, embora haja evidências de casas deste tipo antes e depois deste período (SCHMITZ; ROGGE, 2011).

Por razões ainda não esclarecidas, mas provavelmente devido a mudanças na organização social para um estilo de vida mais nômade e também por mudanças climáticas, os Caingangues progressivamente mudaram seu modo de construir para edificações totalmente sobre o solo, feitas de madeira, folha e palha (D'ANGELIS; VEIGA, 2003). Durante o séc. XIX, os indígenas foram quase totalmente afastados por colonizadores alemães e italianos, os quais, ao seu modo, algumas vezes também incorporavam as propriedades térmicas do solo no projeto de suas casas. Casas construídas com porões subterrâneos podiam se valer deles no inverno para proteger as áreas principais da casa do frio e da umidade, e, no verão, como espaços frios para armazenar comida (WEIMER, 1987). Alguns projetos combinavam estes porões com pés-direitos altos e janelas no sótão, de modo que, em dias de calor, mantendo as janelas do porão e do sótão abertas, o ar resfriado na base pudesse circular por convecção e fornecer melhor conforto térmico para o restante da casa.



Figura 8: Casas subterrâneas de indígenas Proto-Jê no sul do Brasil.

(Fonte: SANTAELLA, 2016)

Edificações modernas no Rio Grande do Sul, porém, raramente possuem porões e, ao contrário, reproduzem padrões globalizados sem relação ao clima local. Quando muito, há uma forte inspiração de estilos tropicais brasileiros que não funcionam bem no inverno. Como diz Cucinella (2016, p.1):

The internationalization of building processes – with indifference to sites, cultures, energy and the local terrain – has created a diffusion of models inadequate to the demands of climate and local conditions, such that it has transformed construction into a global energy problem rather than an opportunity.

Nesta arquitetura atual, a energia geotérmica pode fluir à edificação somente se for manipulada via contato indireto. Em outras palavras, a energia deve ser coletada artificialmente do solo por fluidos de transporte, via bombas de calor e/ou trocadores de calor enterrados, e então transmitidas de modo ativo ao interior da edificação. Por outro lado, sistemas assim desfrutam de uma flexibilidade muito maior, permitindo o uso de energia geotérmica também em edificações altas, o que não seria possível pelas técnicas diretas antigas.

3.2 BOMBAS DE CALOR

3.2.1 Princípio de operação

Bombas de calor são instalações baseadas em um ciclo termodinâmico de Carnot reverso, ou seja, elas movem calor de uma fonte de baixa temperatura para outra de temperatura mais elevada pela ação de uma energia motriz externa (SMITH; Van NESS, 1975).

Uma bomba de calor apropriada para trabalhar tanto nos modos de aquecimento como de resfriamento possui cinco componentes principais: um compressor, uma válvula de expansão, uma válvula de reversão e dois trocadores de calor (evaporador e condensador), como na Figura 9.

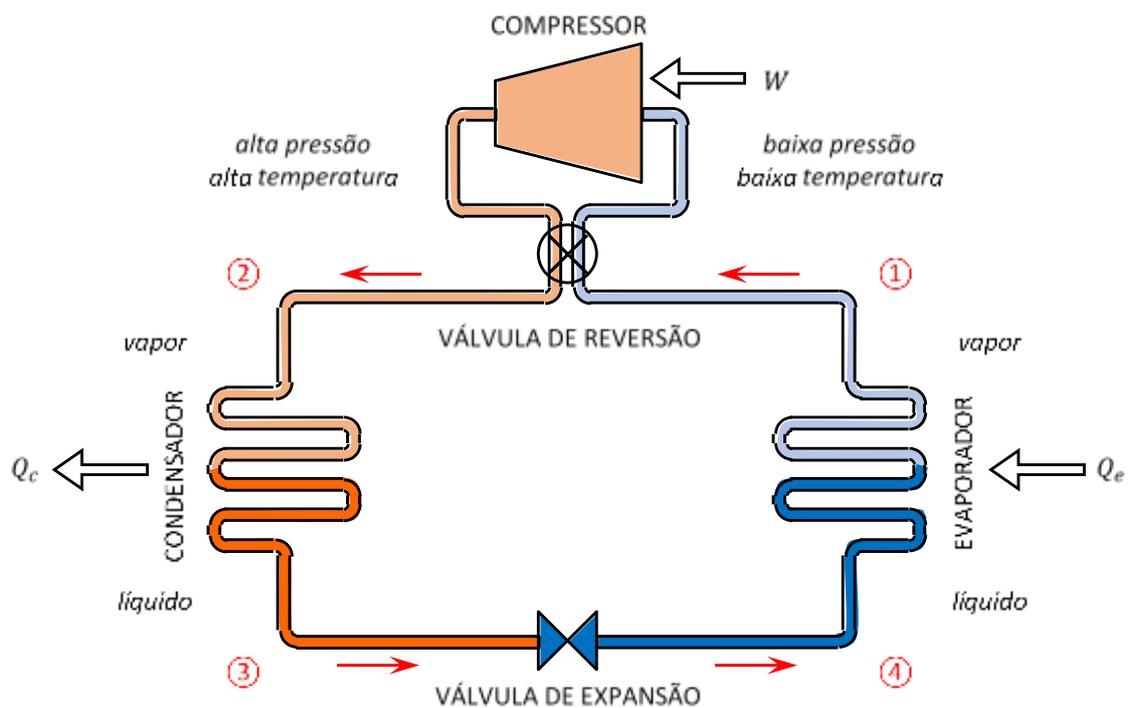


Figura 9: Ciclo de vapor básico de uma bomba de calor.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

1. No compressor, a energia motriz externa (geralmente eletricidade) é consumida pressurizando um vapor de baixa pressão (o fluido refrigerante), resultando em um vapor de alta temperatura e alta pressão.

2. Este vapor passa pelo primeiro trocador, o condensador, onde libera calor para o ambiente, resfriando-se e condensando-se em um líquido de alta pressão e temperatura.
3. O líquido quente passa por uma válvula de expansão adiabática, a qual reduz bruscamente sua pressão e, conseqüentemente, sua temperatura (efeito Joule-Thomson). Este efeito é a chave para a geração de frio em ciclos de refrigeração.
4. Finalmente, no segundo trocador, o evaporador, o líquido de baixa pressão absorve calor do ambiente e ferve, tornando-se um vapor de baixa pressão. Este refrigerante pode então retornar ao compressor e reiniciar o ciclo.

Através da válvula de reversão, o refrigerante pode se mover na direção oposta no ciclo e os trocadores são invertidos (o condensador e o evaporador trocam funções), de modo que o mesmo aparelho possa ser usado para resfriar ou aquecer um ambiente fechado. Outros componentes e acessórios como ventiladores, tubulações e controles podem estar presentes também para facilitar a operação.

O balanço de energia na bomba de calor é dado por (SMITH; Van NESS, 1975):

$$Q_c = Q_e + W \quad (3.1)$$

onde W é a energia motriz consumida no compressor; Q_e é o calor absorvido no evaporador; e Q_c é o calor cedido no condensador. Como pode ser inferido, mais calor é sempre transferido ao lado quente do que removido do lado frio, de modo que o aumento geral de temperatura (e entropia) é sempre positivo, como determinado pela segunda lei da Termodinâmica (SMITH; Van NESS, 1975).

Termodinamicamente, o processo é melhor representado em um diagrama de temperatura x entropia ou de pressão x entalpia, como na Figura 10.

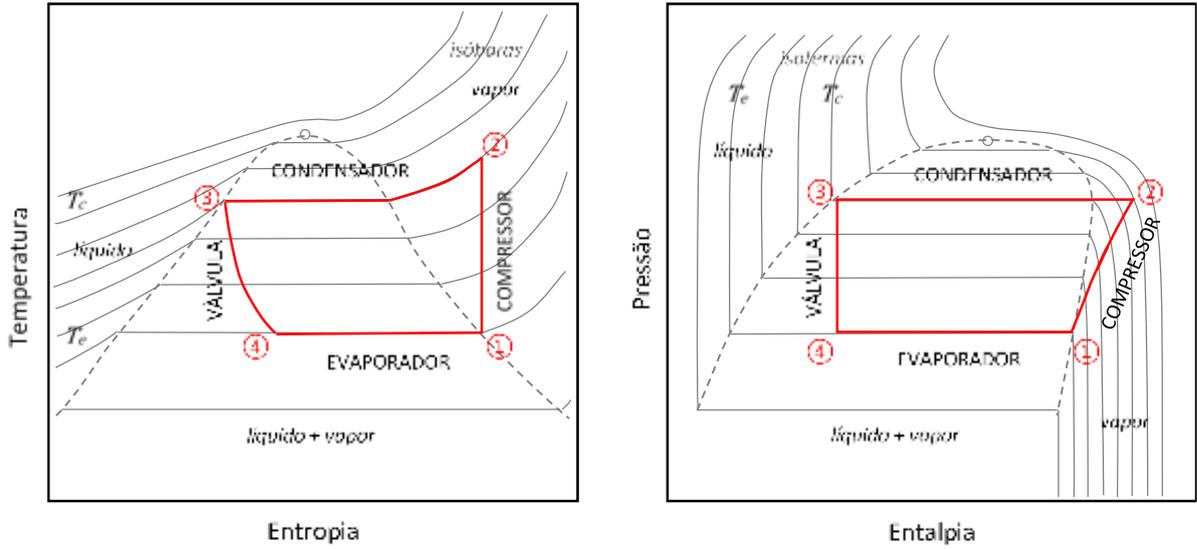


Figura 10: Ciclo teórico de vapor em uma bomba de calor de um único estágio.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Como ilustrado nos diagramas, o ciclo de trabalho de uma bomba de calor é definido pelas temperaturas de operação na zona fria (evaporador, T_e) e na zona quente (condensador, T_c). Em ciclos ideais, como na Figura 10, o compressor opera em um processo isentrópico, a válvula de expansão é isentálpica e as mudanças de fase acontecem sob pressão constante (SMITH; Van NESS, 1975). Aparelhos reais possuem “vazamentos” de calor para/do ambiente ao longo do ciclo que desperdiçam energia motriz e reduzem a eficiência, como na Figura 11.

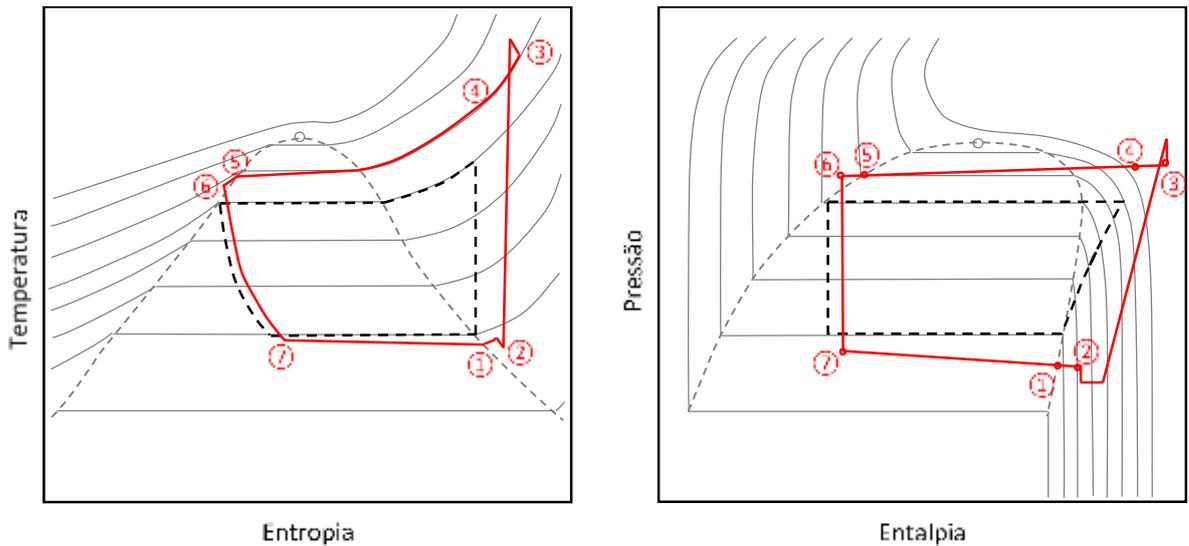


Figura 11: Ciclo termodinâmico real de um sistema em estágio único.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

A taxa de transferência de calor em cada trocador é definida por (KERN, 1983):

$$Q = \dot{m}\Delta h = U \cdot A \cdot LMTD \quad (3.2)$$

onde \dot{m} é o fluxo mássico do refrigerante; Δh é a variação de entalpia do refrigerante; U é o coeficiente de transferência de calor; A é a área da superfície de troca térmica e $LMTD$ é a média logarítmica entre os diferenciais de temperatura dos dois fluidos (ou fontes).

3.2.2 Tipos de bombas de calor

Bombas de calor podem ser classificadas por: (1) fonte/dreno de calor, (2) sistema de distribuição de calor, e (3) tipo de circuito (como na Figura 12). Por fonte/dreno, temos:

- *Air source heat pumps* (ASHP): trocam calor com o ar e incluem os tradicionais aparelhos de ar condicionado (A/C) e refrigeradores. Nos aparelhos A/C *split* comuns, o compressor, o condensador e a válvula de expansão estão juntos na parte externa da edificação, enquanto somente o evaporador é instalado no interior. Em sistemas maiores, todo o sistema é externo e o ar condicionado é bombeado ao interior via dutos de distribuição (WU, 2009).
- *Ground source heat pumps* (GSHP): trocam calor com o solo, tomando vantagem da sua estabilidade térmica. Além da bomba em si, GSHPs possuem uma conexão enterrada, que é a maior parte do sistema. Bombas de calor que utilizam a água como o meio de troca também estão incluídas nesta categoria.

Pela forma de distribuição de ar, há dois tipos de sistemas:

- *Water-to-air systems*: uma serpentina no evaporador/condensador troca calor diretamente com o ar, que é então distribuído à edificação. Com o auxílio de dispositivos adicionais, o mesmo sistema pode controlar a renovação de ar e a umidade.
- *Water-to-water systems*: também chamados de “hidrônicos”, o calor é trocado com água, que é bombeada pela edificação transferindo o calor por radiadores e *fan coils* locais ou por radiadores embutidos no piso ou teto (SELF *et al.*, 2013). Estes sistemas de *radiant heating and cooling* (RHC) operam com temperaturas mais amenas do que sistemas convencionais de ar forçado, agindo diretamente sobre a

massa da edificação. Isto gera um maior impacto sobre o conforto do usuário e permite um menor uso de energia.

Finalmente, pelo tipo de circuito, há duas classificações em função do circuito externo (fechado/aberto) e do circuito do refrigerante (duplo/simples):

- Em circuitos fechados, o fluido de transferência é encerrado no circuito e não entra em contato direto com o exterior (SELF *et al.*, 2013). É a escolha mais versátil para GSHPs, como em GCHPs ou SWHPs (detalhados na seção 3.3).
- Em circuitos abertos, o sistema troca calor diretamente com águas superficiais ou subterrâneas extraídas do meio externo. Possuem uma eficiência maior por utilizarem sempre um fluido fresco com temperatura constante, mas dependem da sua disponibilidade, das regulações locais e exigem maior manutenção.
- Em circuitos duplos, a configuração mais comum, a bomba de calor troca energia do fluido refrigerante para um segundo circuito (geralmente água ou uma solução anticongelante), que é o exposto ao ambiente externo.
- Em circuitos simples, ou *direct exchange systems* (DX), o fluido refrigerante passa também ao circuito externo, eliminando o trocador e a bomba intermediária. Isto aumenta a eficiência geral, mas requer maiores investimentos em refrigerante e material, uma vez que todo o sistema é pressurizado (SELF *et al.*, 2013).

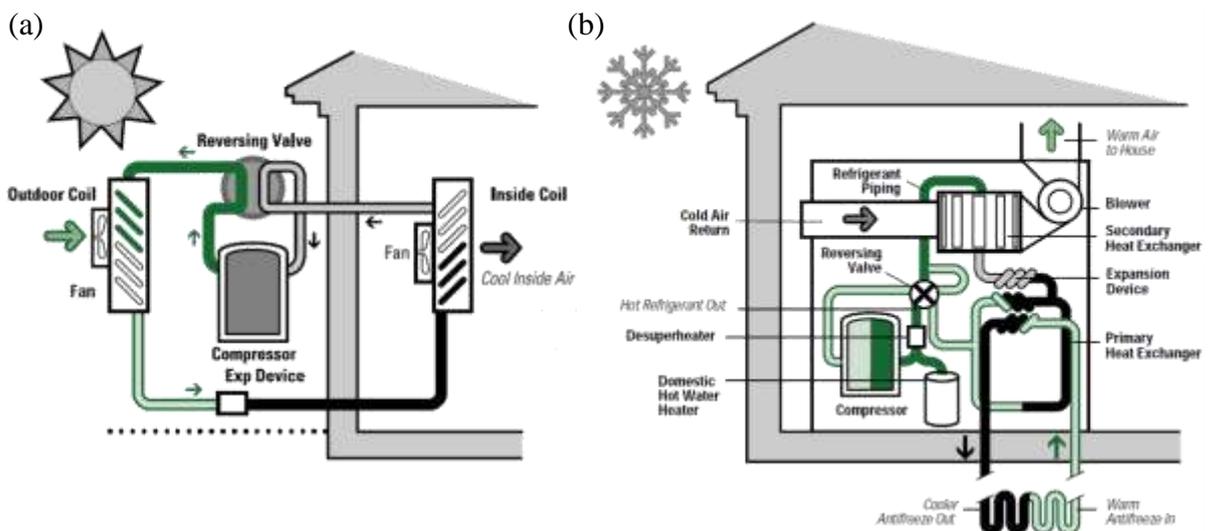


Figura 12: Diferentes tipos de bombas de calor.

- (a) ASHP; distribuição de ar: *fan coil*; ciclo simples; ciclo externo: aberto; resfriamento.
 (b) GSHP; distribuição de ar: dutos; ciclo duplo; ciclo externo: fechado; aquecimento.

(Fonte: ENERGUIDE, 2016)

3.2.3 Eficiência energética de uma bomba de calor

Uma das características mais atrativas de bombas de calor é a de transportarem mais energia do que a que necessitam para operar. Assim, enquanto aparelhos que geram calor como aquecedores a gás ou elétricos alcançam uma eficiência máxima de 100%, bombas de calor, por moverem calor em vez de gerarem, possuem eficiências sempre maiores – de fato, várias vezes maiores (Tabela 3).

Em bombas de calor, a eficiência é medida através do coeficiente de desempenho (*coefficient of performance, COP*). Ele é definido como a razão entre o efeito útil produzido e a energia requerida para a operação (ASHRAE, 2009).

$$COP = \frac{\text{efeito útil de aquecimento/resfriamento}}{\text{energia líquida fornecida por fontes externas}} \quad (3.3)$$

O *COP* real de um equipamento em uma determinada condição depende de várias variáveis, especialmente as temperaturas de operação. Valores tabelados como os da Tabela 3 são medidos em condições padrão ou se referem a faixa de operação típica de cada dispositivo.

Tabela 3: Eficiências típicas para diferentes dispositivos de condicionamento térmico.

(Fonte: Adaptado de OMER, 2008; WU, 2009; SELF et al., 2013; EnerGuide, 2015)

Dispositivo de condicionamento térmico	COP aquecimento	COP resfriamento
Fornalhas a óleo	0,60 – 0,65	-
Aquecedores a gás de média eficiência	0,78 – 0,82	-
Aquecedores a gás de alta eficiência	0,88 – 0,97	-
Aquecedores de piso elétricos	1	-
Air source heat pumps (ar condicionados)	2,3 – 3,5	3,2 – 7,9
Ground source heat pumps – circuitos fechados	3,1 – 5,0	3,9 – 7,6
Ground source heat pumps – circuitos abertos	3,6 – 6,0	4,7 – 9,1

O *COP* máximo teórico para um par de temperaturas de operação é o *COP* de um ciclo de Carnot, onde não há ineficiências. Para um ciclo de resfriamento, isto seria:

$$COP_{cooling} = \frac{Q_e}{W} = \frac{Q_e}{Q_c - Q_e} = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{1}{T_c/T_e - 1} \quad (3.4)$$

Para um ciclo de aquecimento, o COP é definido por:

$$COP_{heating} = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_e} = \frac{T_c}{T_c - T_e} = \frac{1}{1 - T_e/T_c} \quad (3.5)$$

Se o COP for medido ao longo de um ano, ele é chamado de coeficiente de desempenho sazonal (*seasonal performance coefficient, SPF*). Para o resfriamento, é comum também que o COP seja medido com o calor útil em BTU/h e a potência exigida em W. Este é o *energy efficient ratio, EER*, relacionado ao COP por (ASHRAE, 2011):

$$COP_{cooling} = \frac{EER}{3,413} \quad (3.6)$$

Tanto para aquecimento como para resfriamento, pode ser visto pelas equações 3.4 e 3.5 que o COP será maior à medida em que T_c e T_e estiverem próximos um do outro ou, em outras palavras, quanto maior for a temperatura no evaporador e menor no condensador. Mas ao mesmo tempo, estas temperaturas estão separadas pelas temperaturas do ambiente externo (ou fonte) e do ambiente condicionado (a edificação):

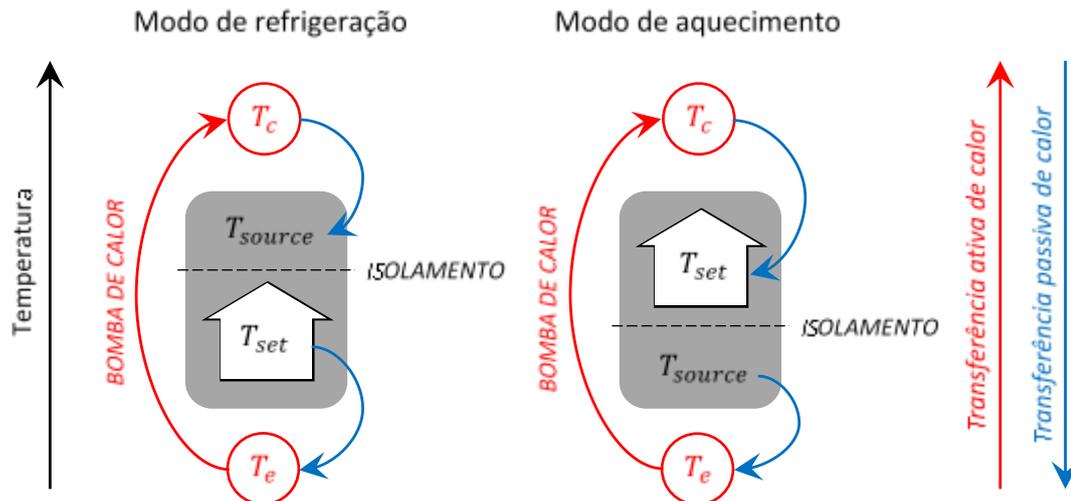


Figura 13: Fluxos de calor em um condicionamento térmico.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Isto também implica em que quanto mais próxima a temperatura da fonte (T_{source}) estiver da temperatura (desejada) da edificação (T_{set}), mais próximos T_c e T_e poderão estar um do outro e maior será o COP . Este é exatamente o princípio da superioridade energética das GSHPs sobre as ASHPs, uma vez que as primeiras podem operar em temperaturas mais

vantajosas. Ainda, porque as temperaturas flutuam muito mais para ASHPs ao longo do ano, estas podem operar grande parte do tempo em baixa eficiência. Já para as GSHPs, devido ao atraso térmico do solo, pode acontecer mesmo de, em algumas situações, a temperatura do solo (T_g) oferecer por si só uma transferência de calor espontânea para a edificação – por exemplo, quando no modo de resfriamento, T_g já estiver abaixo da T_{set} desejada. Neste caso, a bomba de calor em si pode ser desviada e o sistema todo funcionar como um trocador de calor passivo.

3.3 BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS (GSHP)

Bombas de calor geotérmicas, (*geothermal heat pumps*, GHP) ou *ground-source heat pumps* (GSHP), são conhecidas também como *earth energy systems* (EES), *ground-source systems* (GSS) ou *GeoExchange systems* (OMER, 2008; KAVANAUGH, 1992). A seguinte classificação é a adotada pela ASHRAE (2011), que é considerada a principal referência no campo (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014).

3.3.1 Groundwater heat pumps (GWHP)

GWHPs foram o tipo mais amplamente usado de GSHPs até o desenvolvimento dos GCHPs (ASHRAE, 2011). GWHPs são um sistema de circuito aberto que usam águas subterrâneas como meio de transferência de calor (Figura 14), extraídas por meio de um poço e descarregadas de volta ao subterrâneo ou irrigadas sobre o solo (SELF *et al.*, 2013).

GWHPs tendem a ser usadas para necessidades maiores, uma vez que seus poços são relativamente baratos comparados com os de circuitos fechados e podem transportar grandes quantidades de água. Assim, a redução no custo por capacidade com o aumento da escala é muito maior para GWHPs do que para GCHPs, (ASHRAE, 2011). Se a água for fria o bastante, é possível até mesmo resfriamento direto, sem refrigeração mecânica. Por outro lado, GWHPs dependem da disponibilidade de água subterrânea, permissão de regulações ambientais e geram um maior custo de manutenção devido às precauções contra incrustação e corrosão (ASHRAE, 2011).

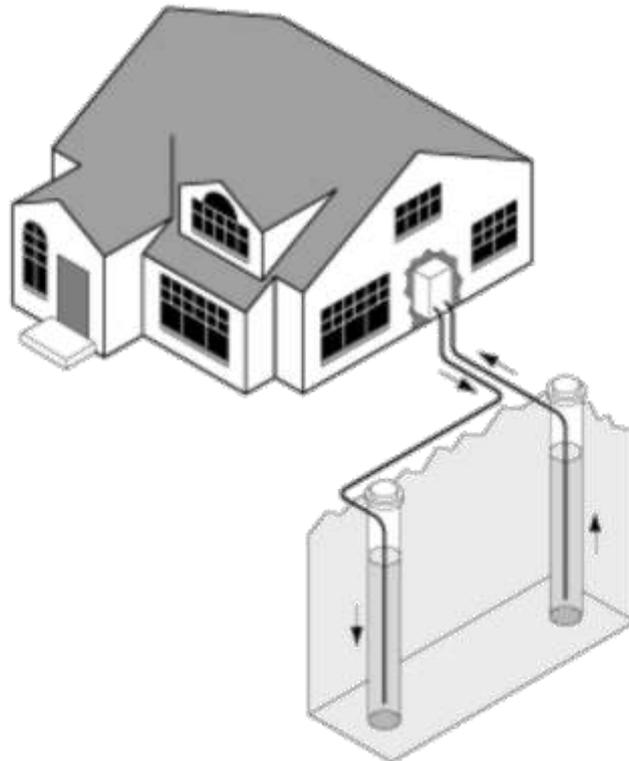


Figura 14: Sistema de um GWHP unitário.

(Fonte: WU, 2009)

3.3.2 Surface water heat pumps (SWHP)

Apesar de não estarem realmente conectadas ao solo, mas à água, SWHPs ainda são consideradas um subgrupo de GSHPs em função das similaridades de aplicação e instalação (ASHRAE, 2011). Seja como for, uma vez que corpos de água superficiais possuem propriedades térmicas diferentes do solo ou de águas subterrâneas, algumas peculiaridades se aplicam.

SWHPs de circuito fechado (Figura 15) funcionam de maneira similar às GCHPs, mas com o circuito externo mergulhado em um lago, rio ou outra fonte de água. Por esta diferença, SWHPs oferecem transferências de calor muito superiores e custos de instalação menores, sem necessidade de escavação, menos tubulações e manutenção mais fácil (ASHRAE, 2011). Em contrapartida, corpos de água menores sofrem mais com variações de temperatura do que o solo e a serpentina do circuito externo corre maiores riscos de dano (ASHRAE, 2011).

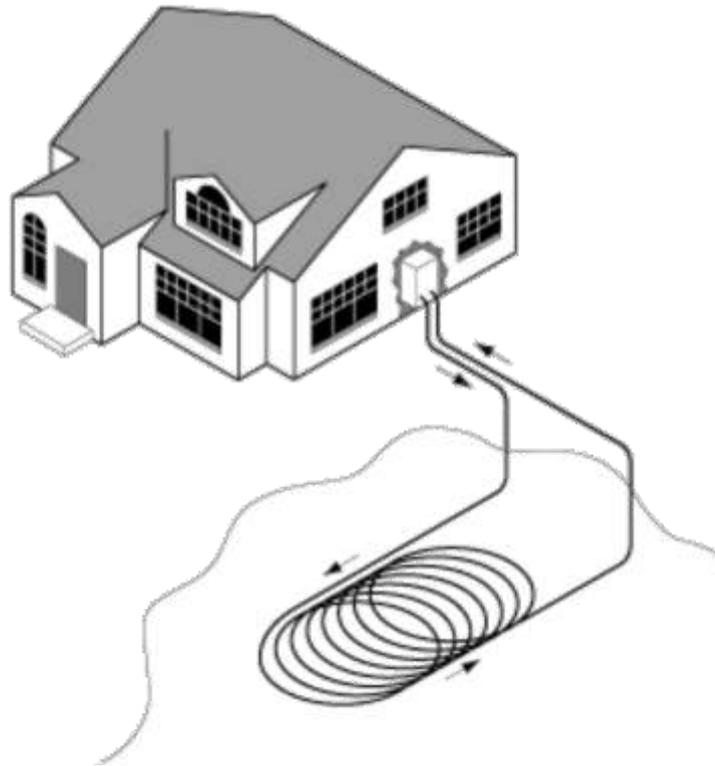


Figura 15: Um SWHP de circuito fechado em um lago.

(Fonte: WU, 2009)

SWHPs de circuito aberto operam de forma similar a GWHPs, combinando características destes com os de circuito fechado, como instalação simples e possibilidade de resfriamento direto, sem refrigeração. Porém, em climas mais frios onde a temperatura da água cai abaixo de 7 °C, não são uma opção viável para aquecimento (ASHRAE, 2011).

3.3.3 Ground-coupled heat pumps (GCHP)

GCHPs são hoje o tipo mais usado de GSHPs, majoritariamente na configuração de *water-to-air* em um circuito duplo (Seção 3.2.2). Frequentemente, são chamadas simplesmente de bombas de calor de circuito fechado, embora, estritamente, este nome se aplique também a parte das SWHPs. Equipamentos compactos (todas as peças em uma mesma unidade), como na Figura 16, estão disponíveis na faixa de 2 a 175 kW (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014). Unidades menores geralmente apresentam eficiências maiores em função da menor demanda exigida pelos ventiladores.

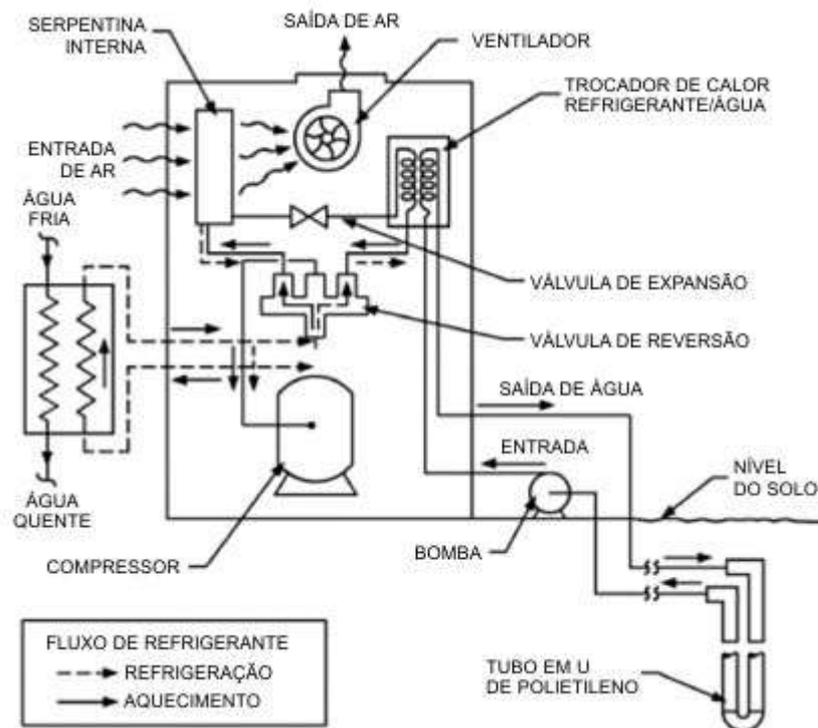


Figura 16: Funcionamento de um sistema de GCHP *water-to-air*.

(Adaptado de: KAVANAUGH, 1985)

GCHPs são subdivididas de acordo com o circuito externo: horizontal ou vertical.

GCHPs horizontais (Figura 17) distribuem a tubulação em trincheiras enterradas a apenas alguns metros da superfície, e são a opção mais comum quando há bastante espaço disponível. Em cada trincheira, pode haver de um a múltiplos tubos (geralmente dois, quatro ou seis), organizados em camadas ou em serpentinas espirais (“*slinky*”). Usar mais de um tubo em uma mesma trincheira reduz a área de escavação necessária, mas exige em troca um maior comprimento total de tubulação para compensar a interferência térmica entre tubos adjacentes.

Comparados aos GCHPs verticais, os horizontais têm um custo de instalação muito mais baixo, já que o custo de uma escavadeira é muito menor do que o de uma perfuratriz e o pessoal e o equipamento são mais acessíveis. Porém, requerem mais área, mais material e levemente mais energia de bombeamento, além de oferecerem uma eficiência um pouco menor por estarem expostos a maiores flutuações de temperatura (ASHRAE, 2011). Para aplicações de grande capacidade (na ordem de 70 kW), a área de escavação necessária começa a tornar GCHPs verticais mais econômicos (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014).

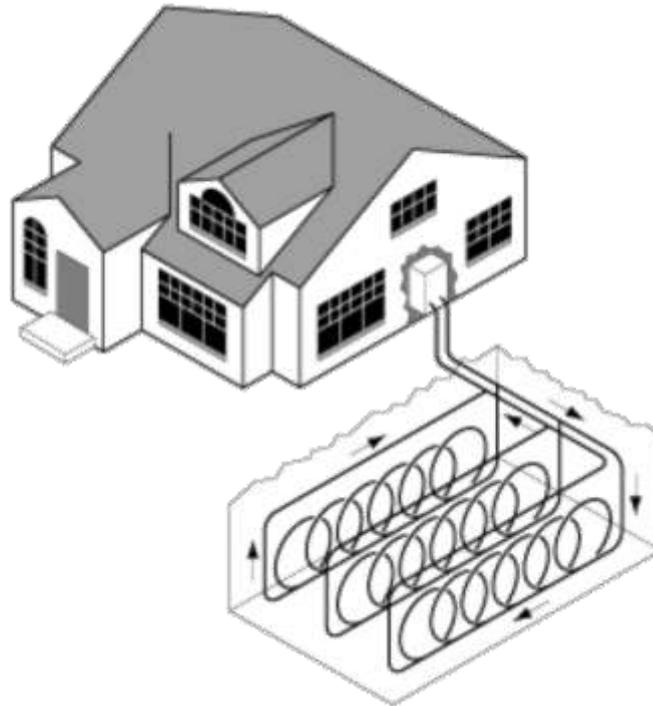


Figura 17: GCHP com tubulação horizontal *slinky*.

(Fonte: WU, 2009)

GCHPs verticais (Figura 18) podem ser formadas por um, dezenas ou mesmo centenas de poços (*boreholes*), cada um consistindo em dois tubos de HDPE de pequeno diâmetro formando uma volta em U no fundo, preenchido com um sedimento especial (ASHRAE, 2011). Os tubos variam em um diâmetro nominal entre 20 a 40 mm, e o poço pode variar entre 15 a 180 m de profundidade, sendo 45 a 75 m o típico para residências (SELF *et al.*, 2013). A fim de evitar interferência térmica entre os poços, a ASHRAE (2011) recomenda uma separação de ao menos 6 m, se estiverem organizados em grelha. Porém, o balanço entre cargas e a presença de água podem reduzir este valor (ASHRAE, 2011).

Como comentado, GCHPs verticais requerem um investimento inicial geralmente maior do que os horizontais devido aos equipamentos envolvidos. Porém, por apresentarem uma maior eficiência e um menor custo de operação, além de a diferença de custos de escavação cair com a escala (ASHRAE, 2011), tendem a ser mais economicamente viáveis para grandes empreendimentos (OMER, 2008). Talvez por isso, as GCHPs verticais ainda são de longe o tipo mais comum (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014) e os que atraíram mais interesse de pesquisa e da prática de Engenharia (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014).

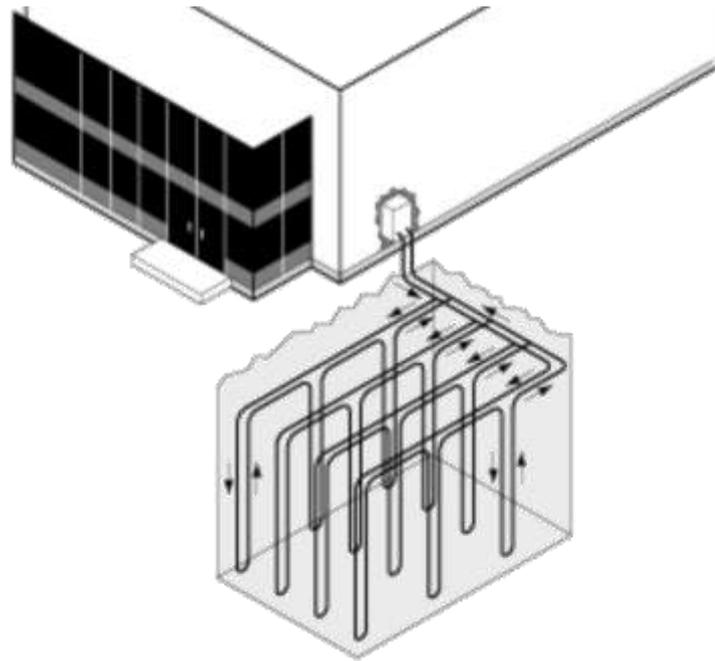


Figura 18: GCHP com tubulação vertical.

(Fonte: WU, 2009)

3.4 TROCADORES DE CALOR TERRA-AR (EAHX)

Outra alternativa tecnológica desenvolvida para o condicionamento térmico de edificações são os trocadores de calor terra-ar (*earth-to-air heat exchangers*, EAHX), também chamados de *earth-tube heat exchangers* (ETHE) ou *earth pipes*. Embora também baseados em energia geotérmica, é importante ressaltar que esses trocadores não são bombas de calor, o que significa que não há um dispositivo capaz de refrigeração, apenas troca de calor passiva com o solo. EAHXs, como na Figura 19, consistem simplesmente em dutos enterrados, através dos quais o ar externo é puxado para dentro da edificação, normalmente forçado por ventiladores, sendo resfriado no verão e aquecido no inverno, antes de ser usado para ventilação (PFAFFEROTT, 2003).

Uma vez que o ar possui uma capacidade calorífica muito menor do que a de um líquido, a capacidade para troca de calor de EAHXs também é muito menor do que a de uma GSHP – a água pode carregar 3000 vezes a energia do mesmo volume de ar (LOFTNESS; HAASE, 2013). Além disso, como não há uma bomba de calor, EAHXs não podem por conta própria aumentar ou reduzir a temperatura do ar além da temperatura do solo e exigem instalações muito maiores

para o mesmo efeito térmico – se possível. Outra desvantagem é que a ventilação é necessariamente combinada com a troca de calor, o que impõe restrições de controle. Por fim, uma vez que o ar flui abaixo do solo, esta tecnologia não é recomendada para o resfriamento em climas quentes e úmidos devido à umidade do ar facilmente alcançar o ponto de orvalho e condensar dentro dos dutos (TAMVAKOLOGOS *et al.*, 2010). Acúmulo de sujeira é outro problema em potencial. Por outro lado, EAHXs podem ser atrativos por sua grande simplicidade, não exigindo aparelhos sofisticados ou mão-de-obra especializada para instalação. EAHXs também podem ser usados como pré-condicionadores para A/Cs, reduzindo seu consumo de eletricidade (PFAFFEROTT, 2003). Em climas moderados, especialmente para resfriamento, eles podem mesmo ser suficientes para o conforto térmico se combinados com um bom projeto térmico para a edificação. Como estudado por Tamvakologos *et al.* (2010), em locais de clima quente e seco como na Grécia, os resultados podem ser impressionantes.

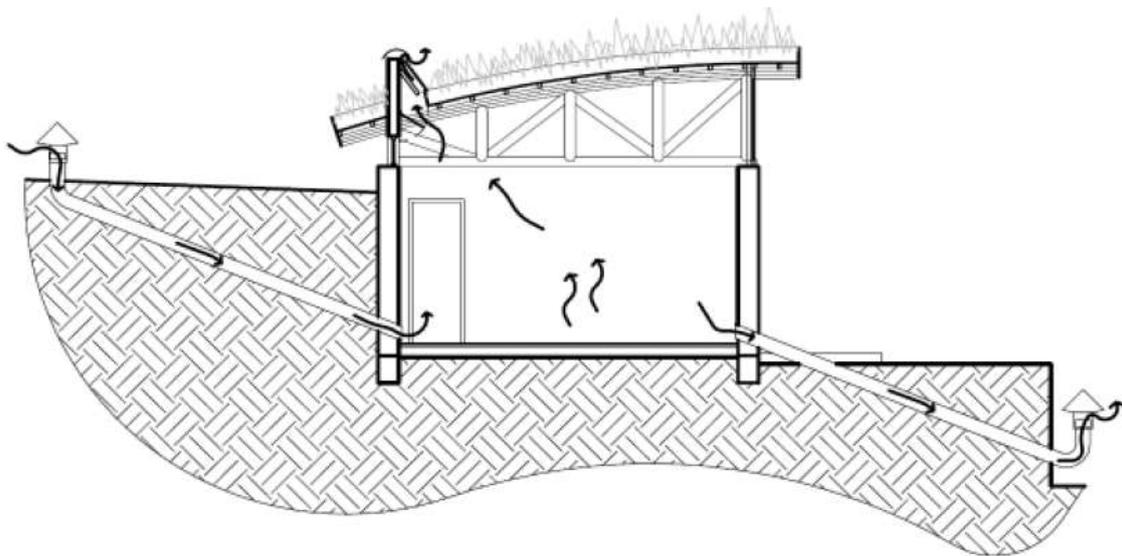


Figura 19: EAHX: dutos de ar enterrados no protótipo Ventura.

(Fonte: MUSSKOPF, 2006)

Devido à sua simplicidade, EAHXs parecem ser o primeiro tipo de tecnologia geotérmica a ser estudado onde o conhecimento ainda está no início. No Brasil, enquanto muito poucos estudos foram encontrados sobre GHEs (como os de MUSSKOPF, 2006; SILVA, NETO, 2010; VAZ, 2011; CHINELATTO, 2013), todos eram apenas sobre EAHXs.

3.5 LUCRATIVIDADE E POTENCIAL

3.5.1 Histórico e uso global

Embora o conhecimento público sobre a tecnologia geotérmica ainda seja baixo, o conceito de bombas de calor geotérmicas já é conhecido desde o séc. XIX (SELF *et al.*, 2013), com o primeiro registro conhecido encontrado em uma patente suíça de 1912 (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014). A primeira demonstração bem-sucedida de uma GSHP ocorreu em 1946, na *Commonwealth Building* em Portland, Oregon (STUEBI, 2000), levando à primeira onda de interesse e às primeiras aplicações comerciais, na América do Norte e na Europa. A teoria analítica básica para a condução de calor em um sistema de GSHP, ainda usada hoje, também foi proposta naquela época por Ingersoll e Plass.

Esse progresso durou até o início dos anos 1950, quando gás e petróleo se tornaram amplamente usados como combustíveis para aquecimento. Contudo, nos anos 1970, após a Primeira Crise do Petróleo, as GSHPs voltaram a despertar interesse e foram feitos esforços consideráveis para estabelecer padrões de instalação e métodos de projeto. Pela virada do século, era estimado que o número global de instalações de GSHP estivesse crescendo continuamente, na base de 10% a 30% ao ano (BOSE *et al.*, 2002).

Tabela 4: Crescimento global do uso de GSHPs até 2015.

(Fonte: LUND; BOYD, 2016)

Variável	1995	2000	2005	2010	2015
Capacidade (MWt)	1.854	5.275	15.384	33.134	50.258
Utilização (TJ/ano)	14.617	23.275	87.503	200.149	326.848
Fator de capacity ⁽¹⁾	0,25	0,14	0,18	0,19	0,206
Instalações	155.000	690.000	1.100.000	2.760.000	4.188.000

(1) Considerando apenas o modo de aquecimento

Apesar de um futuro promissor, o crescimento da tecnologia tem sido consideravelmente mais lento do que para outras tecnologias de energia renovável. Entre os diversos fatores, Self *et al.* (2013, p. 345) incluem: “(...) *non-standardized system designs; significant capital cost when compared to other systems; limited individuals knowledgeable in*

the installation of GSHPs; and limitations (...) from government policies”. Embora esses fatores ainda existam, GSHPs estão desfrutando de um rápido crescimento de popularidade. De acordo com Lund *et al.*, (2011), somente no período entre 2005 e 2010, a capacidade instalada de GSHPs mais que duplicou (Tabela 4). O tamanho mais comum de uma unidade de GSHP é de 12 kW, mas varia desde 2 kW (uso residencial) a mais de 150 kW (usos comerciais e industriais) (LUND, 2011).

A maioria das instalações se encontra na América do Norte, Europa e China, mas mais de 48 países já adotavam a tecnologia em 2015 (LUND & BOYD, 2016). Os líderes atuais são os Estados Unidos, China, Suécia, Alemanha e França (Tabela 6). É interessante notar que a China não estava nem entre os principais atores até o início do séc. XXI (Tabela 5), mas vem investindo pesado na tecnologia nos últimos anos (assim como em outras energias renováveis).

Tabela 5: Países líderes no uso de bombas de calor geotérmicas em 2004.

(Fonte: LUND *et al.*, 2004)

País	Capacidade térmica instalada (MWt)	Uso anual de energia (GWh)	Número de instalações de GSHPs
Estados Unidos	6.300	6.300	600.000
Suécia	2.300	9.200	230.000
Alemanha	640	930	46.400
Suíça	525	660	30.000
Canadá	435	600	36.000
Áustria	275	370	23.000
Global	12.000	20.000	1.100.000

Tabela 6: Países líderes no uso de bombas de calor geotérmicas em 2015.

(Fonte: LUND; BOYD, 2016)

País	Capacidade térmica instalada (MWt)	Uso anual de energia (GWh)	Número de instalações de GSHPs
Estados Unidos	16.800	18.519	1.400.000
China	11.781	27.864	980.000
Suécia	5.600	14.422	500.000
Alemanha	2.590	4.500	215.000
França	2.010	3.028	163.000
Global	50.258	90.790	4.188.000

Enquanto na Europa o principal uso de GSHPs é para aquecimento, nos EUA, o líder atual em instalações, o maior crescimento tem sido nos estados do Sul, onde a demanda por resfriamento é a mais importante (LUND *et al.*, 2004).

Entre os países em desenvolvimento, embora o uso de GSHPs ainda seja insignificante, ele possui um potencial de grande relevância econômica. Devido ao rápido crescimento no consumo energético residencial e industrial, estas economias já necessitam investir grandes quantias em geração e distribuição de energia. A infraestrutura para redes de gás e eletricidade possui um custo particularmente alto. Neste sentido, quanto mais GSHPs (ou também ASHPs) de alta eficiência forem usados, mais poderão ser reduzidos os investimentos em redes de energia, assim como os picos de demanda (TAYLOR *et al.*, 2011). Este retorno pode facilmente justificar incentivos governamentais para tornar a aquisição de GSHPs mais acessível, especialmente para grandes consumidores.

3.5.2 Comparação com alternativas tradicionais

Embora haja outras tecnologias tradicionais de aquecimento competindo com GSHPs, para resfriamento, ASHPs são a única (SELF *et al.*, 2013). Por isso, a comparação aqui será apenas entre ASHPs e GSHPs, o que ainda é uma comparação complexa. Cada uma possui vantagens e desvantagens definidas, mas o balanço geral para qual é a mais apropriada depende bastante de cada caso, especialmente em situações onde geotermia é nova.

Projeto:

ASHPs são muito simples de se instalar e não requerem escavações. O mesmo certamente não é verdade para GSHPs, porém estas oferecem maior flexibilidade aos projetistas, já que arquitetos não têm que lidar com equipamentos de HVAC sobre terraços, paredes ou o piso no caminho de decisões projetuais (STUEBI, 2000).

ASHPs são independentes do solo, enquanto GSHPs exigem uma investigação prévia ao projeto. Disponibilidade de água e restrições determinam a possibilidade do uso de uma GWHP e características do solo influenciam o custo das escavações e eficiência do sistema (WU, 2009).

Custos:

O custo de instalação de ASHPs é indiscutivelmente menor do que o de GSHPs, embora este varie bastante entre tipos e condições. Esta diferença é ainda maior no caso de *retrofit* de edificações existentes, onde o custo de escavações pode aumentar bastante. Já em novas edificações, o custo pode ser minimizado se o trocador for combinado com as fundações da edificação, valendo-se das escavações já necessárias para o sistema estrutural. Conhecidas como *energy piles*, este circuito é montado como espirais ao redor dos pilares ou ao longo das fundações (MORRONE et al., 2014).

De qualquer maneira, porém, GSHPs podem ser sempre mais eficientes do que ASHPs (seção 3.2.3), poupando custos de operação. Como são instalados em um ambiente mais estável, GSHPs são pouco afetadas pelo clima e requerem pouca manutenção. Por outro lado, o circuito enterrado é mais difícil de se alcançar, e uma boa qualidade de instalação é essencial (WU, 2009). De acordo com Self *et al.* (2013), outra vantagem das GSHPs está em aumentarem o valor do imóvel, o que facilita o retorno do investimento pode facilitar o financiamento.

Ambiente:

Ambos os tipos de bomba de calor são mais eficientes e causam menos impacto ao meio-ambiente do que sistemas de condicionamento a combustível, mas GSHPs superam ASHPs em um consumo muito menor de energia elétrica e um menor uso de fluidos refrigerantes (com menos risco de vazamentos) (WU, 2009). GCHPs, porém, podem perturbar o solo se as cargas térmicas estiverem muito desbalanceadas, e GWHPs e SWHPs têm o risco potencial de contaminação de águas.

Confiabilidade:

De acordo com um relatório do *United States Department of Energy* (EERE, 2001), a expectativa de vida de um ASHP é de 15 anos. Já para GSHPs, algumas instalações dos anos 1950 ainda operam com um bom desempenho, e estima-se que uma vida útil de ao menos 30 para mais de 50 anos pode ser facilmente obtida com manutenção apropriada (STUEBI, 2000).

Conclusões:

Como visto, GSHPs superam ASHPs na maioria dos critérios (Tabela 7). O custo de investimento inicial é a principal desvantagem, especialmente quando o retorno econômico é o principal fator de decisão, o que torna um estudo de viabilidade para cada cenário mais importante.

Tabela 7: Comparação entre ASHPs e diferentes GSHPs.

(Fonte: WU, 2009)

Critério		ASHP	GSHP		
			Vertical	Horizontal	Open-water
Eficiência		√	√√√	√√	√√
Critérios de projeto	Viabilidade	√√	√	√	√
	Dificuldade de construção	√	√√√	√√	√√
Custo do ciclo de vida	Instalação	√	√√√	√√	√√
	Operação	√√	√	√	√
	Manutenção	√√	√	√	√
	Total	√√	√	√	√
Meio-ambiente	Emissões de CO ₂	√√	√	√	√
	Perturbação do solo	não	√√	√	√
	Contaminação da água	não	não	não	√
Durabilidade		√	√√	√√	√√
Aspectos práticos	Restrições de operação	√√	√	√	√
	Estética	√	√√	√√	√√
	Ruído	√	√√√	√√√	√√√
	Vandalismo	√	não	não	não
	Conforto interno	√	√√	√√	√√
	Segurança	√√	√√	√√	√√

De acordo com Wu (2009), Self *et al.* (2013) e Sarbu e Sebarchievici (2014), GSHPs tendem a ser mais viáveis economicamente do que ASHPs e geradores de calor para:

- Construções novas, onde a instalação é mais fácil, ou na substituição de um sistema existente no fim da vida útil;
- Grandes edificações, onde o ganho de escala é maior;
- Climas caracterizados por grande variação diária ou sazonal de temperatura;
- Demandas de aquecimento e resfriamento balanceadas, de modo a aproveitar a capacidade da bomba de calor e evitar sistemas complementares;
- Disponibilidade de água (GWHPs e SWHPs tendem a custar menos do que GCHPs);
- Alto custo de eletricidade e de gás natural ou indisponibilidade deste.

3.5.3 Sistemas híbridos

Como para qualquer equipamento projetado para mais de uma condição de operação, picos de demanda desbalanceados levam a uma GSHP ser superdimensionada para uma das condições, o que não somente é um desperdício de capacidade, como demanda maiores investimentos. Infelizmente, esta é a situação para qualquer clima onde aquecimento ou resfriamento seja preponderante. Uma alternativa neste caso é dimensionar a GSHP para a menor demanda e combiná-la com um absorvedor/purgador de calor suplementar, criando um sistema de GSHP híbrido (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014).

Como mostrado na Figura 20, o dispositivo suplementar é conectado em série com a GSHP. Se resfriamento for a maior demanda, então o suplemento pode ser uma torre de resfriamento; se for aquecimento, um coletor solar.

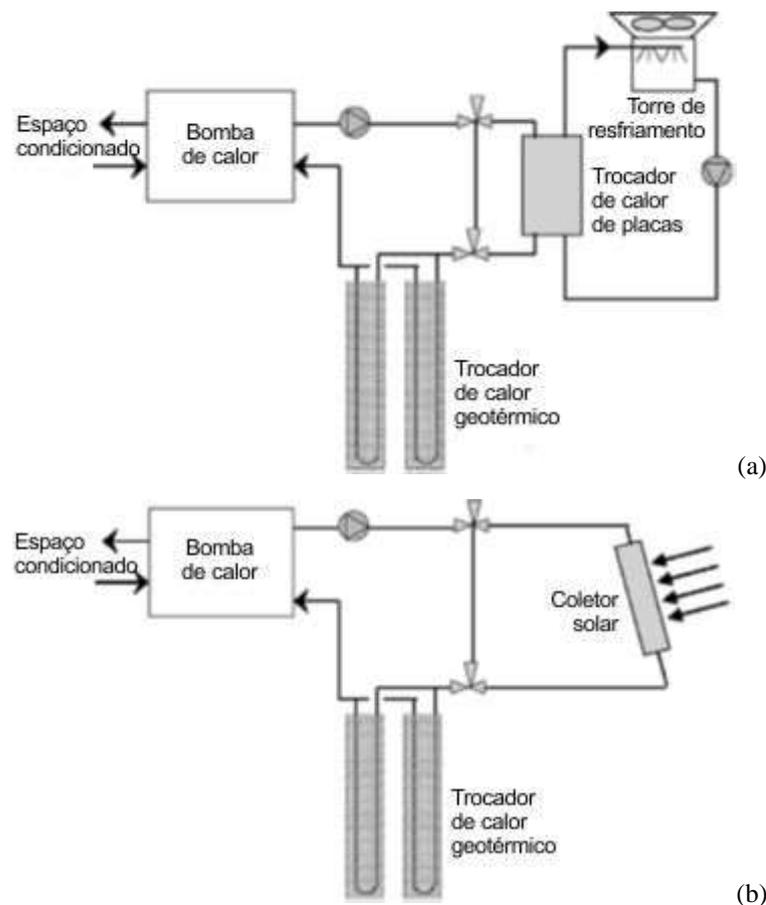


Figura 20: Diagrama de um HGCHP com: (a) torre de resfriamento, ou (b) coletor solar.

(Adaptado de: SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014)

Além de complementar as necessidades de energia durante os picos de demanda, um sistema híbrido pode ser mantido operando durante períodos de baixa demanda para acumular energia para quando necessário. Por exemplo, em climas frios, um coletor solar pode ser usado no verão para aquecer o solo com energia que pode ser resgatada no inverno pela GSHP. Esta ideia não é nova e foi proposta primeiramente por Penrod em 1956, sendo ainda estudada em trabalhos recentes como os de Chiasson e Yavuzturk (2003), Yuehong *et al.* (2004) e Ozgener e Hepbasli (2005).

Contudo, Kavanaugh e Rafferty (2014) ressaltam que, embora sistemas híbridos reduzam os custos de instalação, eles terminam com as vantagens naturais que GCHPs têm de baixa manutenção e simplicidade de controle.

3.5.4 Potencial como energia renovável

GSHPs usam a energia renovável do sol armazenada no solo próximo à superfície, além da energia elétrica proveniente do sistema. A parcela renovável depende do *COP*, geralmente constituindo entre 66% a 75% da energia total necessária para o condicionamento térmico (SARBU, SEBARCHIEVICI, 2014). Assim, mesmo se a parcela de energia elétrica for gerada por combustíveis fósseis, a substituição de formas convencionais de condicionamento (especialmente aquecimento) por bombas de calor acelera a redução das emissões de carbono devido à geração de energia – e isso a custos mínimos ou mesmo negativos, se a substituição for lucrativa. Como dizem Taylor *et al.* (2011, p. 2): “[...] *there is synergy between heat pumping and lower-carbon electricity supply policies*”.

Outro potencial que já está sendo explorado é a combinação de GSHPs com sistemas de geração local de eletricidade para criar edificações autossuficientes em energia.

Exceto em climas amenos e casas bem otimizadas, o condicionamento térmico é uma das principais demandas de uma edificação. Em grande parte da Europa, apenas o aquecimento de espaços e de água são responsáveis por até 80% dessa demanda (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014). Na maioria do Brasil, demandas de aquecimento não são altas, mas resfriamento é frequentemente uma preocupação. E embora já haja soluções passivas consolidadas para aquecimento, tais como coletores solares, a refrigeração ainda depende de sistemas ativos. Agravando o problema, a potência elevada de aparelhos de A/C e aquecedores

elétricos é exatamente o ponto fraco de energias renováveis produzidas on-site, como painéis fotovoltaicos ou geradores eólicos. Mesmo abastecer a uma única unidade de A/C somente com painéis FV ainda é difícil de ser viável economicamente, mesmo com os avanços atuais.

Para este problema, GSHPs são uma combinação perfeita por reduzirem a demanda de energia a um ponto onde pequenos geradores são capazes de dar conta. Isto é o que está sendo feito em diversos projetos de *net zero energy* e carbono zero ao redor do mundo. Bons exemplos incluem a *100K € Home* na Itália (CUCINELLA, 2016), a *IEBau (Institute of Energy in Building) House* na Suíça e o *DOE (Department of Energy) Multifunctional Heat-Pump*, nos Estados Unidos. Na maioria dos casos encontrados, bombas de calor são usadas em combinação com painéis de RHC ou lajes ativadas. O assim chamado “edifício comercial mais verde do mundo”, o *Bullitt Center*, é outro exemplo notável. Enquanto ele é famoso por sua imensa cobertura de painéis fotovoltaicos, eles somente são capazes de produzir toda a energia necessária porque o Center já é 83% mais eficiente energeticamente do que uma edificação típica em Seattle (PORADA, 2013), e um dos pilares para esta alta eficiência é o uso de GSHPs (Figura 21).

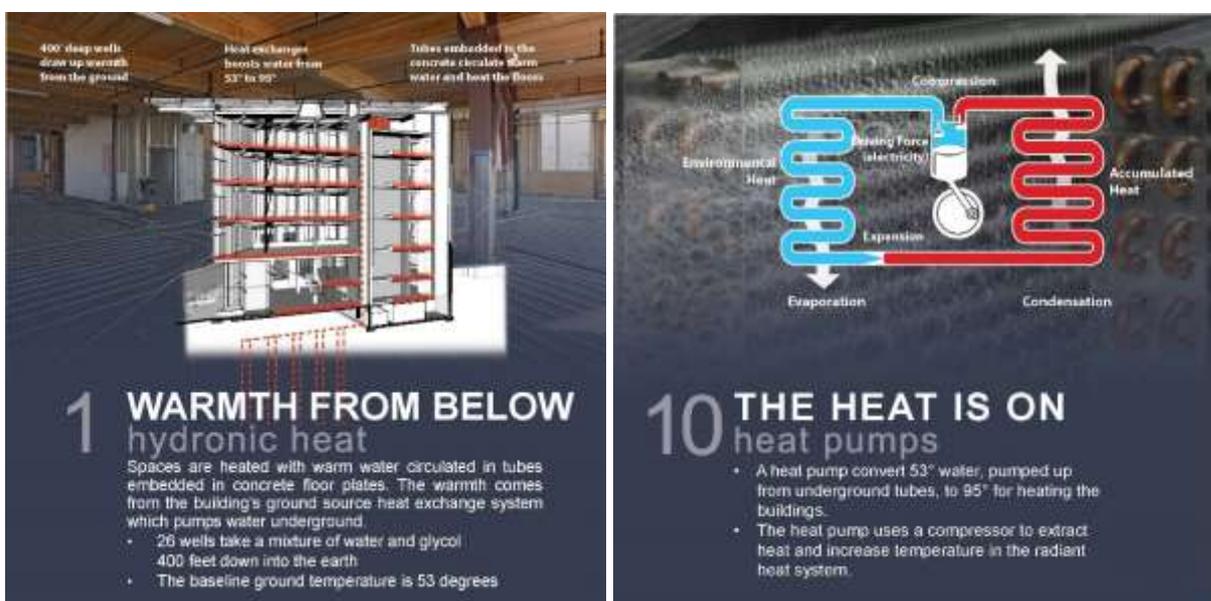


Figura 21: Contribuição de GSHPs para a autossuficiência de energia do Bullitt Center.

(Fonte: BULLITT, 2013)

4 PROJETO DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

4.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA GCHPs

O principal objetivo de uma análise térmica em uma GCHP é determinar a temperatura do fluido circulando pelos tubos enterrados e a bomba de calor em certas condições de operação. Os outros objetivos são controlar a mudança desta temperatura ao longo do tempo e mantê-la sempre dentro de limites aceitáveis (YANG *et al.*, 2010). Para isso, as variáveis de projeto a serem manipuladas são basicamente o comprimento dos tubos e seu layout de distribuição.

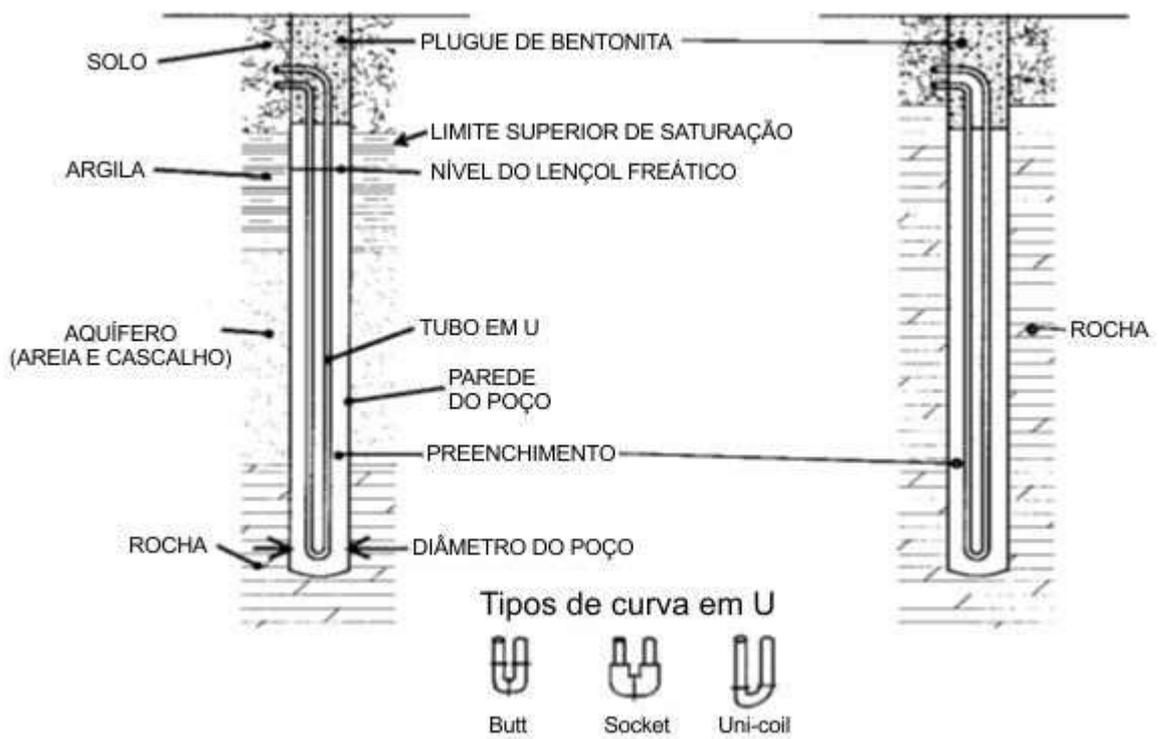


Figura 22: Esquema de um poço vertical para diferentes formações de solo.

(Adaptado de: KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014)

A transferência de calor em um poço de GCHP, porém, envolve diversos fatores incertos, como as propriedades do solo, o fluxo de águas subterrâneas e as cargas térmicas da edificação ao longo de vários anos. Para poços verticais, este é um sistema transiente especialmente complexo, de modo que o processo é normalmente modelado como duas regiões

separadas (Figura 22). Uma região é o solo sólido externo ao poço, tratado como um processo transiente; a outra é o poço em si, com os tubos em U, o fluido circulante no seu interior e o sedimento (*grout*) no exterior, algumas vezes tratado como em estado estacionário, outras como transiente (YANG *et al.*, 2010). Quanto mais complexo e preciso o modelo, maior o esforço e tempo de cálculo necessários.

4.1.1 Transferência de calor fora do poço

- **Modelo linear infinito de Kelvin (ILS):** Foi a primeira abordagem, assumindo o poço como uma fonte linear infinita e o solo ao seu redor como um meio infinito com temperatura inicial uniforme (YANG *et al.*, 2010). Este modelo simplifica a condução de calor como unidimensional, desprezando a transferência ao longo do eixo do poço. Desta maneira, a qualquer momento, a temperatura em qualquer distância do poço é dada por:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q_L}{4\pi k} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (4.7)$$

onde T_0 é a temperatura inicial; r é a distância do eixo; t é o tempo de operação; q_L é a taxa de aquecimento por comprimento de poço; e k e α são a condutividade e difusividade térmicas do solo. Este modelo simples é amplamente utilizado, mas é preciso apenas para poços curtos em um espaço de tempo entre horas a alguns meses (YANG *et al.*, 2010). Ainda assim, já oferece uma boa estimativa para condições de pico.

- **Modelo de fonte cilíndrica:** Este modelo é uma evolução do anterior, considerando uma fonte cilíndrica infinita em vez de uma linha, onde a fronteira é a superfície do poço com uma temperatura constante ou com uma transferência de calor constante (puramente por condução) (YANG *et al.*, 2010). Neste caso, a distribuição de temperatura é dada por:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q_L}{k} G\left(\frac{\alpha t}{r_b^2}, \frac{r}{r_b}\right) \quad (4.8)$$

onde r_b é o raio do poço, com as seguintes condições de contorno:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} & r_b < r < \infty \\ -2\pi r_b k \frac{\partial T}{\partial r} &= q_L & r = r_b, t > 0 \\ T - T_0 &= 0 & t = 0, r > r_b \end{aligned} \quad (4.9)$$

G , na equação 4.8, é uma expressão matemática complexa, geralmente resolvida por referências gráficas ou tabeladas (YANG *et al.*, 2010).

- **Modelo de Eskilson:** Foi um avanço em relação ao modelo de fonte cilíndrica ao adaptá-lo a um comprimento finito, adequando-o então a simulações de operação a longo prazo (YANG *et al.*, 2010). Via um método numérico de diferenças-finitas, a temperatura na superfície do poço é dada por:

$$T_b - T_0 = \frac{q_L}{2\pi k} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{L}\right) \quad (4.10)$$

e as condições de contorno:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} & T(r, 0, t) &= T_0 \\ q_L(t) &= \frac{1}{L} \int_L^{D+L} 2\pi r k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_b} dz & T(r, z, 0) &= T_0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

onde z é a profundidade do poço; L é o comprimento total; D é a parte superior do poço (que pode ser desprezada na prática de engenharia); e $t_s = L^2/9\alpha$, o estado estacionário. A partir deste modelo, já é possível a modelagem de pulsos de calor sobrepostos, parte do método de projetos mais avançados. Porém, ele também é mais difícil de se incorporar a programas e consome mais tempo, em função da complexidade da função g (YANG *et al.*, 2010).

- **Solução de fonte linear finita:** É uma solução analítica do modelo de Eskilson a partir de algumas simplificações, como a do solo como um meio homogêneo semi-infinito e de que o raio do poço é desprezível. Assim (YANG *et al.*, 2010):

$$T(r, z, t) - T_0 = \frac{q_L}{4k\pi} \int_0^L \left\{ \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-x)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-x)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+x)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+x)^2}} \right\} dx \quad (4.12)$$

Pela equação, se vê que a temperatura na superfície do poço (onde $r = r_b$) varia com a profundidade, sendo a profundidade média ($z = 0,5L$) escolhida como representativa.

- **Modelo de passo de tempo curto:** Ao contrário dos anteriores, este modelo de Yavuzturk e Spitler considera a capacidade térmica do poço em si, o que é essencial para modelar respostas a um tempo curto (1 h ou menos). Para isso, são necessários algoritmos numéricos para cada geometria, o que atualmente é possível em simuladores mais avançados como o TRNSYS (YANG *et al.*, 2010).

4.1.2 Transferência de calor dentro do poço

- **Modelo unidimensional:** Simplifica o par de tubos em U como um único tubo de temperatura equivalente em estado estacionário, desprezando o fluxo de calor axial e a capacidade térmica do poço. Apesar da simplicidade, este modelo já é considerado apropriado para a maioria das práticas de engenharia por Bose *et al.* (1985) e Gu e O'Neal (1998). Yang *et al.* (2010), porém, discordam, uma vez que o cálculo do curto-circuito entre os tubos do par seria essencial para estimar o desempenho do trocador de calor.
- **Modelo bidimensional:** Considera a temperatura do fluido no tubo equivalente como uma sobreposição das respostas nos dois tubos separados, permitindo então avaliar o impacto da posição dos tubos dentro do poço no desempenho (YANG *et al.*, 2010).
- **Modelo quasi-tridimensional:** Aprimora o anterior considerando também a variação da temperatura no tubo com a profundidade e valores diferentes para os tubos de entrada e retorno (YANG *et al.*, 2010). A solução geral depende de transformações de Laplace complexas, de modo que processos alternativos são usados na prática (YANG *et al.*, 2010).

4.1.3 Comparação

De acordo com Yang et al. (2010), embora modelos numéricos ofereçam maior flexibilidade e precisão comparados com os analíticos, muitos são inconvenientes para ser incorporados diretamente a um método de projeto ou um simulador de energia. Por outro lado, modelos analíticos são fáceis de se usar e consomem menos tempo de cálculo, mas são feitos em cima de simplificações que podem limitar sua aplicação ou precisão.

Tabela 8: Comparação dos atuais modelos de simulação para poços de GCHPs.

(Fonte: YUNG *et al.*, 2010)

Região	Modelo	Método	Interferência térmica entre poços	Efeitos de fronteira
Fora do poço	Fonte linear de Kelvin	Fonte linear infinita	Sim	Não
	Fonte cilíndrica	Fonte cilíndrica infinita	Sim	Não
	Modelo de Eskilson	Combinação de métodos analíticos e numéricos	Sim	Sim
	Solução de fonte linear finita	Métodos analíticos	Sim	Sim
	Modelo de passo de tempo curto	Métodos numéricos	Sim	Sim
Região	Modelo	Método	Interferência térmica entre tubos em U	Fluxo de calor ao longo da profundidade
Dentro do poço	Unidimensional		Não	Não
	Bidimensional		Sim	Não
	Quasi-tridimensional		Sim	Sim

4.2 ABORDAGENS PARA O PROJETO DE GCHPs

4.2.1 Abordagem geral

Os primeiros métodos de projeto, capazes de serem resolvidos sem ajuda de um computador, foram baseados no modelo linear infinito de Kelvin, com um número de simplificações. De forma geral, o comprimento necessário do tubo, L , é calculado a partir da

equação geral de transferência de calor para o estado estacionário de um cilindro enterrado no solo (ASHRAE, 2011):

$$L = \frac{qR_g}{T_g - T_f} \quad (4.14)$$

onde q é a taxa de transferência de calor; T_g é a temperatura do solo; T_f é a temperatura do fluido de trabalho; e R_g é a resistência térmica efetiva do solo. Como no modelo de Kelvin, estas variáveis são consideradas constantes em todo o tubo.

Por este método, L é calculado para as duas condições de pico, o mês mais frio e o mais quente do ano, e o comprimento final estipulado para o circuito enterrado do GCHP é escolhido pelo pior caso. Expandindo a formulação da taxa de calor e da resistência térmica, a *International Ground-Source Heat Pump Association* (IGSHPA), um dos primeiros grupos envolvido no desenvolvimento de métodos de projeto de GCHPs (BOSE *et al.*, 1985), estipulou duas fórmulas simples:

$$L_H = \frac{\text{Capacity}_H \left(\frac{COP_H - 1}{COP_H} \right) (R_p + R_g F_H)}{T_g - T_{f,min}} \quad (4.15)$$

$$L_C = \frac{\text{Capacity}_C \left(\frac{COP_C + 1}{COP_C} \right) (R_p + R_g F_C)}{T_{f,max} - T_g} \quad (4.16)$$

onde H e C referem-se aos casos de aquecimento e resfriamento, respectivamente. R_g é obtida pelo modelo de Kelvin; R_p é a resistência térmica de um “tubo equivalente” aos dos tubos em U; F é a fração de operação; e $T_{f,min}$ e $T_{f,max}$ são as temperaturas de entrada mínima e máxima de projeto na bomba de calor.

Apesar de lançar as bases para o dimensionamento dos tubos, este método simplificado ainda não considera os efeitos de longo prazo no solo e as variações na carga térmica da edificação, o que pode em muitos casos causar um desvio considerável entre os valores previstos e os resultados vistos na prática (BOSE *et al.*, 1985; ASHRAE, 2011).

4.2.2 Modelo de ASHRAE/Kavanaugh

Baseados numa sugestão de Ingersoll *et al.* (1954), Kavanaugh e Rafferty (1997) desenvolveram o modelo de fonte cilíndrica calculando a resistência térmica do solo em função de três pulsos de calor: a média anual, uma média mensal (o mês de projeto para aquecimento ou resfriamento) e um pulso curto (as horas de demanda máxima durante o dia de projeto). Os autores também incorporaram R_b , a resistência térmica para o fluxo de calor do fluido de transporte através da parede do tubo e do material de preenchimento do poço até a fronteira com o solo, como ilustrado na Figura 23. Outro acréscimo foi a variação na temperatura do solo a longo prazo devido ao desbalanço entre as cargas de aquecimento e resfriamento, como a temperatura de penalidade T_p .

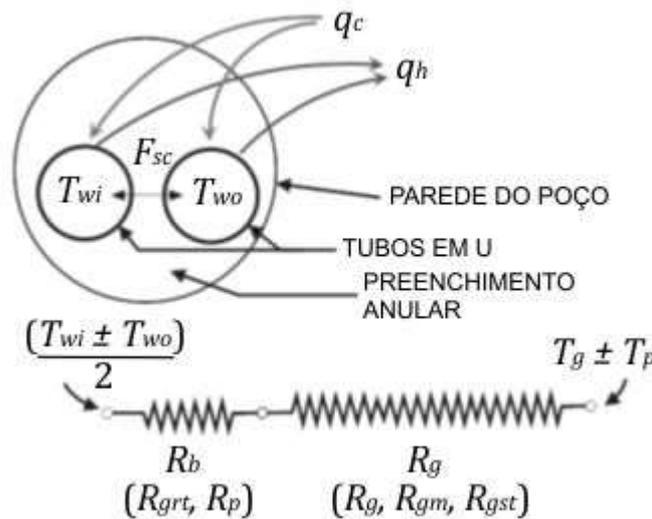


Figura 23: Fluxo de calor interno e externo em um poço para um GCHP.

(Adaptado de: KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014)

Adicionando-se a potência da bomba ao modelo de Kavanaugh e Rafferty (1997), o comprimento do poço para a situação de resfriamento (L_c) e aquecimento (L_h) é estimado por:

$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + (q_c - W_c)(R_b + PLF_{m,c} R_{gm} + F_{sc} R_{gst})}{T_g - \left(\frac{T_{wi,c} + T_{wo,c}}{2}\right) + T_p} \quad (4.17)$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga} + (q_h - W_h)(R_b + PLF_{m,h} R_{gm} + F_{sc} R_{gst})}{T_g - \left(\frac{T_{wi,h} + T_{wo,h}}{2}\right) + T_p} \quad (4.18)$$

onde q_a é a taxa de transferência de calor líquida anual com o solo; $q_{c/h}$ são as cargas de resfriamento/aquecimento de projeto da edificação e $W_{c/h}$ são as potências correspondentes da bomba de calor, todas para o pulso de curta duração (geralmente 4 h); $R_{ga/m/st}$ são as resistências térmicas do solo para o pulso anual, mensal e de curta duração; $PLF_{m,c/h}$ é o fator de utilização de carga durante o mês de projeto (razão da capacidade exigida da bomba); F_{sc} é o fator de perda de calor pelo curto-circuito entre os tubos no poço; $T_{wi,c/h}$ são as temperaturas do líquido entrando na bomba de calor ($ELT_{c/h}$) durante o resfriamento/aquecimento; e $T_{wo,c/h}$ são as temperaturas do líquido saindo da bomba de calor ($LLT_{c/h}$) durante o resfriamento/aquecimento. Nestas equações, a taxa de transferência de calor, as cargas da edificação e a temperatura de penalidade são consideradas positivas para aquecimento e negativas para resfriamento.

R_b é calculada como a soma das resistências através do tubo (R_p) e através do preenchimento do poço (R_{grt}). Para um par de tubos em U, ela é dada por (KAVANAUGH & RAFFERTY, 2014):

$$R_b = R_p + R_{grt} = \left[\frac{1/(\pi d_i h_{conv}) + \ln(d_o/d_i)/2\pi k_p}{2} \right] + \left[\beta_0 \left(\frac{d_b}{d_o} \right)^{\beta_1} k_{grt} \right]^{-1} \quad (4.19)$$

onde d_b , d_o e d_i são respectivamente os diâmetros do poço e externo e interno do tubo; k_p e k_{grt} são as condutividades térmicas do tubo e do preenchimento; h_{conv} é o coeficiente de calor convectivo e β_0 e β_1 são coeficientes relacionados à disposição dos tubos dentro do poço. Coeficientes convectivos, porém, não são fáceis de se estimar diretamente e, como β_0 e β_1 , são calculados empiricamente. Felizmente, Kavanaugh e Rafferty (2014) forneceram uma forma automatizada de cálculo pelo *BoreResistIP-SI.xlsm*, que acompanha seu livro.

As resistências térmicas equivalentes do solo, por sua vez, são calculadas a partir dos Números de Fourier para cada pulso, relacionados pelos fatores-G, determinados por Ingersoll *et al.* (1954):

$$\begin{aligned} R_{ga} &= (G_f - G_1)/k_g \\ R_{gm} &= (G_1 - G_2)/k_g \\ R_{gst} &= G_2/k_g \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned}
 Fo_f &= 4\alpha_g t_f / d_o^2 & t_1 &= 3650 \\
 Fo_1 &= 4\alpha_g (t_f - t_1) / d_o^2 & t_2 &= 3650 + 30 \\
 Fo_2 &= 4\alpha_g (t_f - t_2) / d_o^2 & t_f &= 3650 + 30 + 0.167
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

onde α_g e k_g são as difusividade e condutividade térmicas do solo; t_1 , t_2 e t_f são os pulsos de calor de 10 anos (3650 dias), 1 mês e 6 h; e G_1 , G_2 e G_f são os fatores-G (Figura 24).

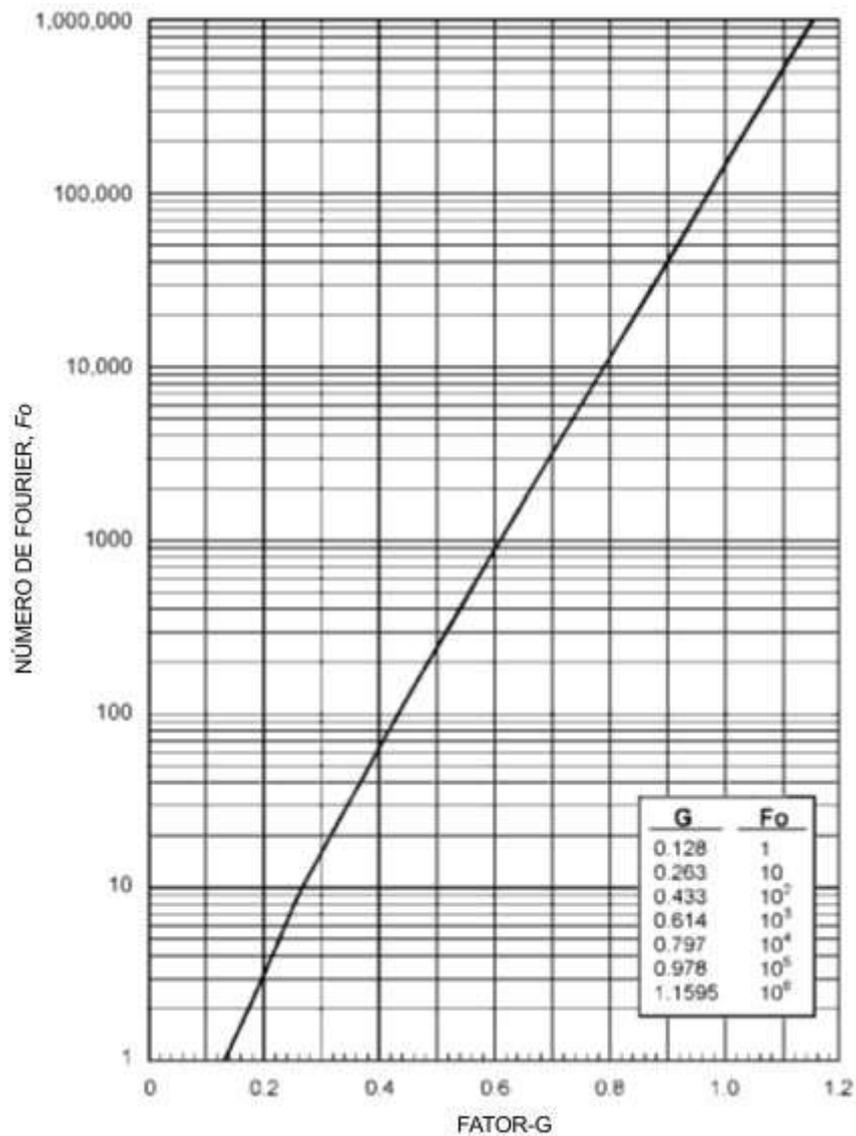


Figura 24: Relação Número de Fourier/Fator-G para a resistência térmica do solo.

(Adaptado de: INGERSOLL *et al.*, 1954)

F_{sc} representa a perda de desempenho devida ao curto-circuito de calor entre os tubos de entrada e retorno de um poço, também determinada empiricamente (Tabela 9). Finalmente, T_p resulta principalmente da interferência entre poços adjacentes. Quanto menor a separação entre estes, menor a área de solo requerida, mas maior a penalidade e o comprimento necessário para cada poço. Para pequenas grelhas, esta temperatura de penalidade é desprezível.

Tabela 9: Fator de curto-circuito para tubos em U em aplicações padrão.

(Fonte: ASHRAE, 2011)

Poços por circuito	Vazão de fluido de transporte de calor	
	36 mL/(s.kW)	54 mL/(s.kW)
1	1,06	1,04
2	1,03	1,02
3	1,02	1,01

As temperaturas de entrada na bomba de calor são parâmetros de projeto, mas as de saída podem ser calculadas por (IDAE, 2012):

$$T_{wo,c} = T_{wi,c} + \frac{P_c \frac{COP_c + 1}{COP_c}}{c_{p,H2O} (V_{H2O}/3600)} \quad (4.22)$$

$$T_{wo,h} = T_{wi,h} - \frac{P_h \frac{COP_h - 1}{COP_h}}{c_{p,H2O} (V_{H2O}/3600)} \quad (4.23)$$

onde $P_{c/h}$ são as capacidades totais da bomba de calor respectivamente às temperaturas de projeto $T_{wi,c/h}$; $c_{p,H2O}$ é o calor específico da água; e V_{H2O} é a vazão no circuito enterrado.

O modelo de Kavanaugh e Rafferty é o divulgado pela ASHRAE em seu *Handbook of HVAC Applications* (2007) para o dimensionamento de GCHPs verticais e horizontais. Conforme Hughes e Shonder (1998), este modelo vem consistentemente se provando bastante preciso quando testado em instalações reais. Entretanto, para a estimativa da evolução da temperatura na parede do poço ao longo do tempo, métodos numéricos como os de Lund/Eskilson ainda funcionam melhor (KUREVIJA *et al.*, 2012).

4.2.3 Recomendações simplificadas da ASHRAE

A fim de facilitar a difusão dos GCHP nos Estados Unidos entre engenheiros e profissionais com menos experiência para modelagens sofisticadas, a ASHRAE (2011) fornece um método simplificado para dimensionamento dos circuitos enterrados, totalmente por meio de tabelas. Este método é direcionado a pequenos sistemas horizontais e verticais, especialmente em aplicações residenciais. Os dados nas tabelas 10 a 12 são baseados em uma análise extensiva de sistemas monitorados por Kavanaugh e Calvert (1995), a maioria na metade sul dos Estados Unidos.

Tabela 10: Arranjos e bombas de calor recomendados para GCHP residenciais.

(Fonte: KAVANAUGH; CALVERT, 1995)

		Capacidade nominal da bomba de calor (kW)				
		7	10,5	14	17,5	21
		Vazão requerida (L/s)				
		0,3 to 0,4	0,5 to 0,6	0,6 to 0,8	0,8 to 0,9	0,9 to 1,1
Tipo de serpentina ^(a)		Número de circuitos em paralelo				
Espiral (10 passos)		3 a 4	4 a 6	6 a 9	8 a 10	8 a 10
	6 tubos	3 a 4	4 a 6	6 a 9	8 a 10	8 a 10
	4 tubos	2 a 3	4 a 6	5 a 8	6 a 9	6 a 10
	2 tubos	2 a 4	3 a 5	4 a 6	5 a 8	6 a 10
Vertical	19 mm PE	2 a 3	3 a 5	4 a 6	5 a 8	6 a 10
	25 mm PE	2 a 3	2 a 4	3 a 5	4 a 6	4 a 6
	32 mm PE	1 a 2	1 a 2	2 a 3	2 a 3	2 a 4
Comprimento da trincheira		Diâmetro do distribuidor – Tubo de PE (mm)				
Menos de 30 m		32	32	38	38 a 51	38 a 51
Entre 30 a 60 m		32	38	38	51	51
		Capacidade (número) de bombas requerida				
		0,06 kW (1)	0,12 kW (1)	0,06 kW (2)	0,12 kW (2)	0,12 kW (2)

(a) Baseada em tubos de DR11 HDPE.

Tabela 11: Comprimentos recomendados de escavação por kW para GCHPs residenciais.

(Fonte: KAVANAUGH; CALVERT, 1995)

Tipo de serpentina ^(a)		Passo ^(b) (m de tubo por m trincheira/poço)	Temperatura do solo (°C) ^(c)						
			7 a 8	8 a 11	11 a 13	13 a 15	15 a 17	17 a 19	19 a 21
Horizontal (valas ou trincheiras)	Espiral 10 passos	10	11	10,5	10	10,5	11	13	16
	6 tubos/Espiral 6 passos	6	16	14	13	14	16	17	20
	4 tubos/Espiral 4 passos	4	17	16	15	16	17	19	23
	2 tubos	2	26	24	22	24	26	30	35
Tubos em U vertical (poços)	Tubo 19 mm	2	16	15	14	15	16	17	20
	Tubo 25 mm	2	15	14	13	14	15	16	19
	Tubo 32 mm	2	14	13	12,5	13	14	15	17

(a) Comprimentos baseados em tubo DR11 HDPE.

(b) Multiplicar o comprimento da trincheira pelo passo para encontrar o comprimento necessário de tubo.

(c) Baseada em $k = 1,0 \text{ W/(m.K)}$ para circuitos horizontais e $k = 2,1 \text{ W/(m.K)}$ para verticais. Valores para temperaturas do solo $< 13 \text{ °C}$, baseados em modelagem usando capacidade nominal da bomba de calor e assumindo uma fonte de calor auxiliar na condição de projeto.**Tabela 12:** Correção de valores da Tabela 11 em função da condutividade do solo.

(Fonte: KAVANAUGH; CALVERT, 1995)

	Condutividade térmica do solo (W/(m.K))								
	0,7	1,0	1,4	1,7	2,1	2,4	2,8	3,1	3,5
Circuito horizontal	1,22	1,0	0,89	0,82	-	-	-	-	-
Circuito vertical ^(a)	-	-	1,23	1,10	1,0	0,93	0,87	0,83	0,79

(a) Valores para circuitos verticais baseados em um preenchimento anular com $k = 1,5 \text{ W/(m.K)}$. Multiplicar comprimentos por 1,2 para $k_{annulus} = 0,7 \text{ W/(m.K)}$ e por 0,95 para $k_{annulus} = 1,9 \text{ W/(m.K)}$.

Como indicado na Tabela 11, este método foi elaborado para temperaturas do solo abaixo de 13 °C , para as bombas operando na capacidade nominal e admitindo uma resistência elétrica como aquecimento suplementar para as condições de pico. Para o Rio Grande do Sul, os comprimentos reais necessários deveriam ser maiores, uma vez que a temperatura maior do solo exigiria um maior comprimento de tubo para a mesma carga de resfriamento. Se a bomba de calor a ser usada não tiver nenhuma fonte suplementar, a capacidade necessária para o aquecimento também deveria ser maior.

4.3 PROGRAMAS DE COMPUTADOR PARA A SIMULAÇÃO DE GCHPs

Enquanto os métodos “manuais” anteriormente abordados são baseados no modelo de fonte linear finita de Kelvin (IGSHPA) ou no de fonte cilíndrica (ASHRAE/Kavanaugh), programas de computador podem se valer de modelos mais sofisticados. Na verdade, independentemente do modelo teórico, qualquer dimensionamento exato de sistemas de GCHP complexos, como um grande número de poços interferindo uns com os outros ou quando a influência de águas subterrâneas deve ser considerada, já exige uma simulação computacional numérica.

Atualmente, há dois métodos básicos para a simulação do transporte de calor e o fluxo de águas subterrâneas (VDI, 2001):

- Método das diferenças finitas (fórmulas matemáticas mais simples);
- Método dos elementos finitos (maior flexibilidade espacial).

De acordo com Yang *et al.* (2014), a maioria das ferramentas computacionais é baseada nos modelos de Eskilson e de fonte linear finita, como os programas *Lund*, *Earth Energy Designer (EED)*, *GLHEPRO*, *GeoStar*, *EnergyPlus*, *eQUEST* e *HVACSIM+*.

O conhecido simulador energético de edificações (*building energy simulation program, BES*) *EnergyPlus* se vale das funções-*g* de Eskilson para simular GCHPs (YANG *et al.*, 2014), empregando um modelo de resistência térmica em estado estacionário para calcular a transferência de calor dentro do poço. Combinando esta simulação com o cálculo das cargas térmicas da edificação, o simulador pode então comparar o consumo de energia com os de sistemas de A/C convencionais.

Em sua versão 8.6, o *EnergyPlus* possui os seguintes modelos de GHE implementados, como parte do grupo “*Condenser Equipment and Heat Exchangers*”:

- GHE: Vertical (GCHP vertical)
- GHE: Pond (GWHP)
- GHE: Surface (SWHP)
- GHE: Horizontal Trench (GCHP horizontal)
- GHE: Slinky (GCHP horizontal em espiral)

Contudo, além de algumas limitações de especificação, o simulador ainda não fornece *templates* fáceis de se usar para estes modelos, como faz para aparelhos de A/C, o que exige que o usuário modele e especifique um sistema inteiro de HVAC somente para utilizá-los. Ao exigir um domínio elevado do projeto de HVACs e do próprio programa, este aspecto pode desestimular seu uso por arquitetos e engenheiros civis.

Nos Estados Unidos, outro programa amplamente usado é o *GchpCalc*, baseado no modelo de fonte cilíndrica (YANG *et al.*, 2014). Já baseados no método de diferenças finitas, foram desenvolvidos alguns programas de simulação numérica, sendo o mais famoso o *TRNSYS*. Este programa funciona como um pacote de componentes onde o usuário descreve cada um e como eles se relacionam. Yang *et al.* (2014), porém, alertam que, apesar da elevada precisão e flexibilidade, programas como o *TRNSYS* podem exigir um grande trabalho computacional dos usuários antes de se obterem os resultados.

Como afirmam Capozza *et al.* (2012), na prática normal de engenharia, muitos projetistas consideram inconveniente o uso de programas fechados ou sofisticados demais. Para diversos programas, apenas profissionais com experiência suficiente em simulações numéricas conseguem conduzir todos os cálculos e obter resultados confiáveis (VDI, 2001). Assim, apesar de todas as soluções atualmente disponíveis, a carência atual é por programas ou metodologias mais fáceis de se usar para promover uma disseminação mais rápida da tecnologia.

5 LEVANTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

5.1 CLIMA

As condições climáticas do Rio Grande do Sul são o principal fator que torna o Estado um bom candidato para o uso de GSHPs. Ao contrário da maioria do Brasil, o Estado se situa na Zona Temperada do Sul e apresenta um clima subtropical úmido (Cfa), pela classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). Nas áreas mais altas, o clima subtropical de altitude (Cfb) é ainda mais frio. Porto Alegre foi a cidade escolhida para este estudo, não somente por ser a maior, mas por ter a maior disponibilidade de dados climáticos detalhados.

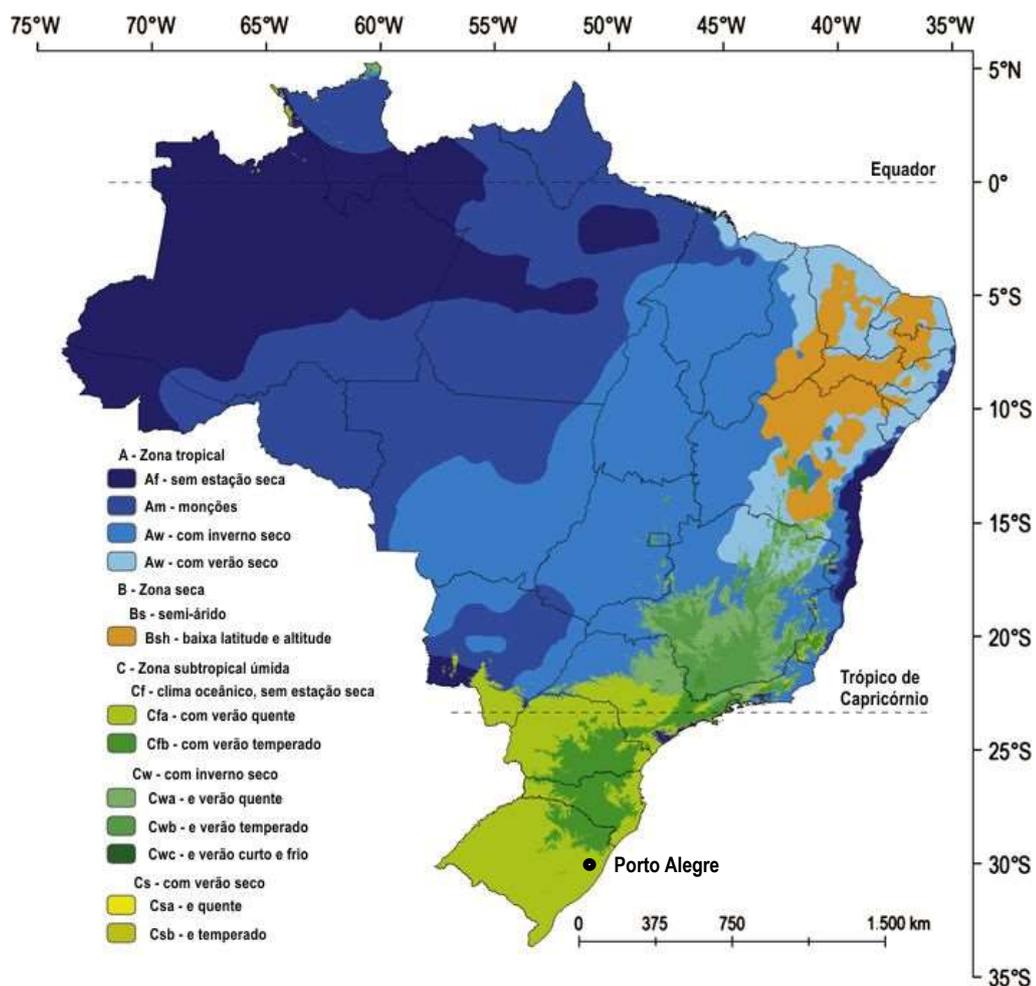


Figura 25: Porto Alegre e a classificação climática do Brasil.

(Adaptado de: ALVARES *et al.*, 2013)

Outra classificação relevante é a por zonas bioclimáticas pela NBR 15220, que apresenta recomendações de diretrizes construtivas para o condicionamento térmico passivo de habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2013). Por este zoneamento (Figura 26), o Rio Grande do Sul apresenta as Zonas 1, 2 e 3, com as recomendações de estratégias passivas B (aquecimento solar), C (inércia térmica) e J (ventilação cruzada).

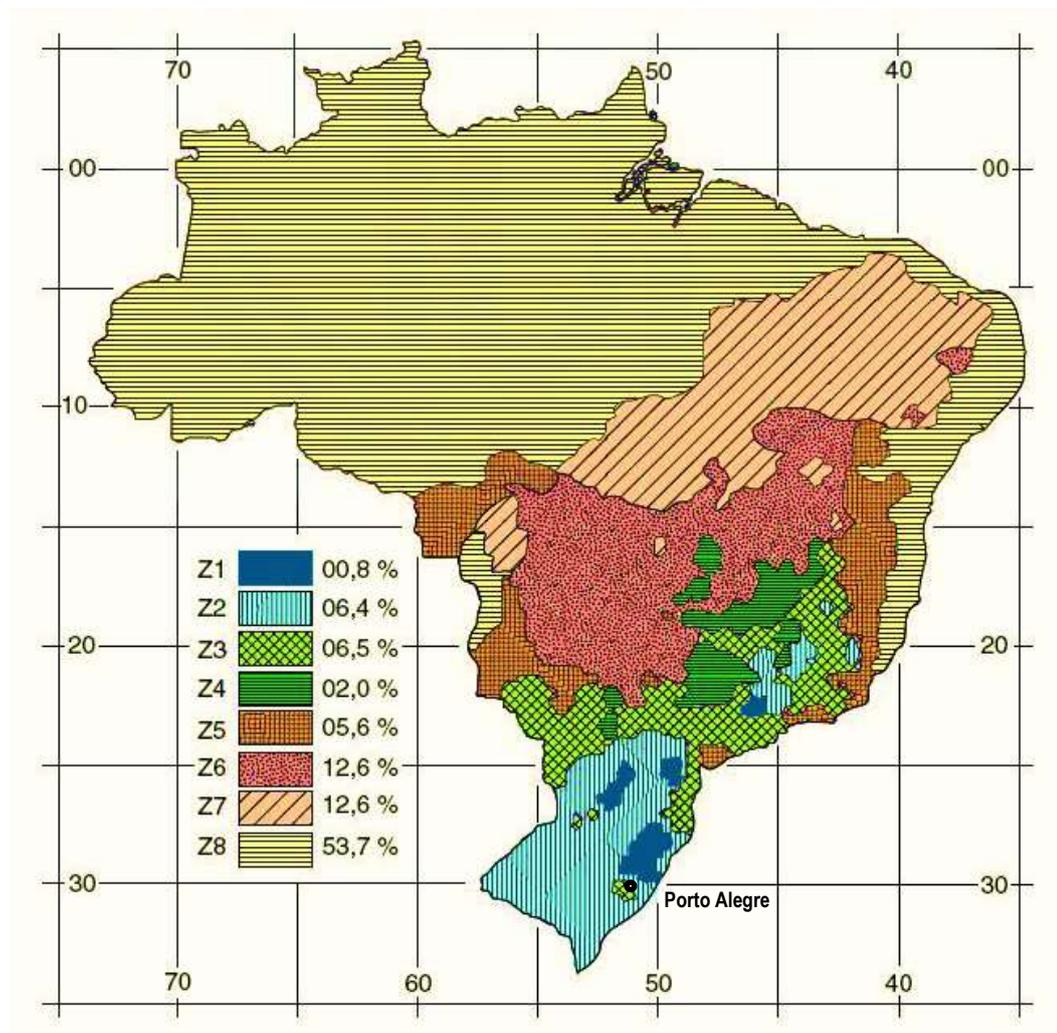


Figura 26: Zoneamento bioclimático brasileiro pela NBR 15220.

(Adaptado de: ABNT, 2013)

A fim de identificar as condições climáticas típicas e extremas a serem consideradas para a estimativa da demanda energética e para o projeto da bomba de calor, é necessária uma base detalhada de dados climáticos. No Brasil, a principal fonte é o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Em Porto Alegre, devido à sua latitude (-30.05°), as quatro estações são relativamente bem marcadas e a cidade experimenta a maior amplitude térmica anual entre as capitais brasileiras, de acordo com as normais climatológicas do BDMEP (INMET, 2016), com uma mínima histórica de $-0,2^\circ\text{C}$ e máxima de $40,6^\circ\text{C}$ (Figura 27). Dados de outras fontes, porém, indicam extremos ainda maiores, como mínima de $-3,0^\circ\text{C}$ pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET, 2016) e máxima de $42,6^\circ\text{C}$ pelo Sistema Metroclima (CEIC, 2014).

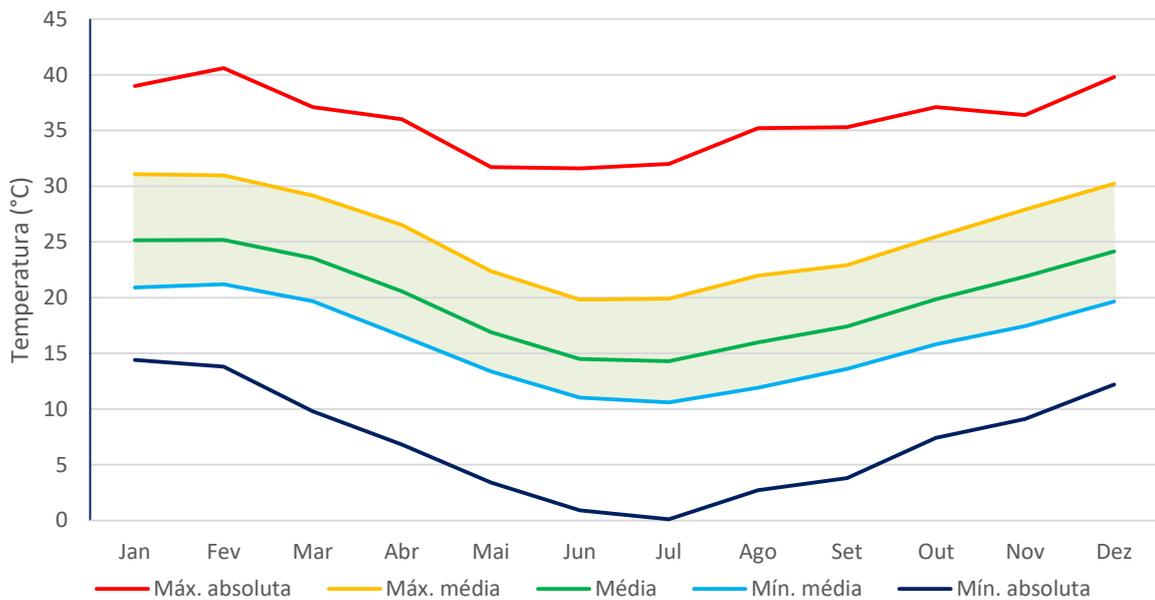


Figura 27: Perfil de temperaturas de Porto Alegre – 2006-2015.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMET, 2016)

A precipitação média é alta e regular ao longo do ano (Figura 28), embora secas ocasionais possam ocorrer. A presença da grande massa de água do Lago Guaíba contribui para uma umidade relativa local elevada, com uma média anual perto de 80% e médias mensais raramente abaixo de 70% (INMET, 2016). Como comentado na Seção 3.4, uma umidade neste nível impede o uso de EAHXs como único meio de resfriamento do ar devido à condensação nos tubos. Esta umidade elevada também torna os verões mormacentos e afeta negativamente a qualidade do ar. Os invernos são relativamente moderados, mas temperaturas frequentemente caem para menos de 10 ou 5°C durante a noite, com mínimas anuais ao redor de 3°C (INMET, 2016). Contudo, mais uma vez devido à alta umidade e também devido ao vento, o desconforto térmico é consideravelmente acentuado.

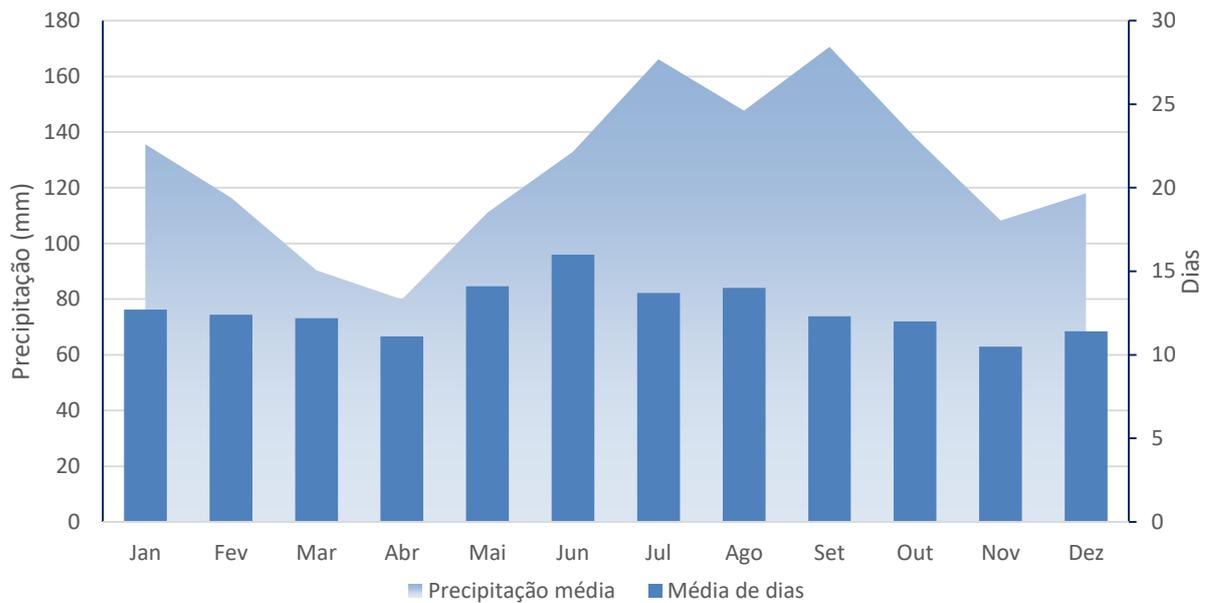


Figura 28: Perfil de precipitação de Porto Alegre – 2006-2015.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMET, 2016)

Adicionalmente, para as simulações energéticas, é necessário um arquivo de dados climáticos compatível. No caso do EnergyPlus, o programa aceita uma larga faixa de propriedades climáticas, mas uma seleção mínima específica deve ser necessariamente fornecida para rodar a simulação e em um formato específico (tipicamente CSV, EPW, TRY, TMY ou SWERA) (DOE, 2016). Os melhores dados compatíveis com estes requisitos vieram do LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética de Edificações) da Universidade Federal de Santa Catarina. Em seu website (LABEEE, 2016), são fornecidos dois tipos de dados climáticos para Porto Alegre (convertidos ao formato EPW), a partir de considerações e fontes diferentes:

- TRY1954: resultado do trabalho de GOULART *et al* (1998) com o método *Test Reference Year* sobre medições em aeroportos pela INFRAERO (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária). Para Porto Alegre, o período analisado foi o de 1951 a 1970, elencando-se o ano de 1954 como referência.
- INMET2016: resultado do trabalho de RORIZ (2012) pelo método TMY sobre dados coletados pelas estações meteorológicas do INMET entre 2001 e 2010. Estes dados foram como parte das atividades para estudar a revisão do Zoneamento Bioclimático do Brasil (NBR 15220-3) e foram especialmente preparados para o uso no EnergyPlus.

Ambos os arquivos se prestam à análise deste trabalho e são também disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2016). O DOE, porém, recomenda arquivos TMY sobre TRY, por serem mais representativos do período analisado (DOE, 2017). Por este motivo, por os arquivos INMET2016 se basearem em um período de dados mais recente e por ainda passarem por atualização, estes arquivos foram os selecionados para este trabalho.

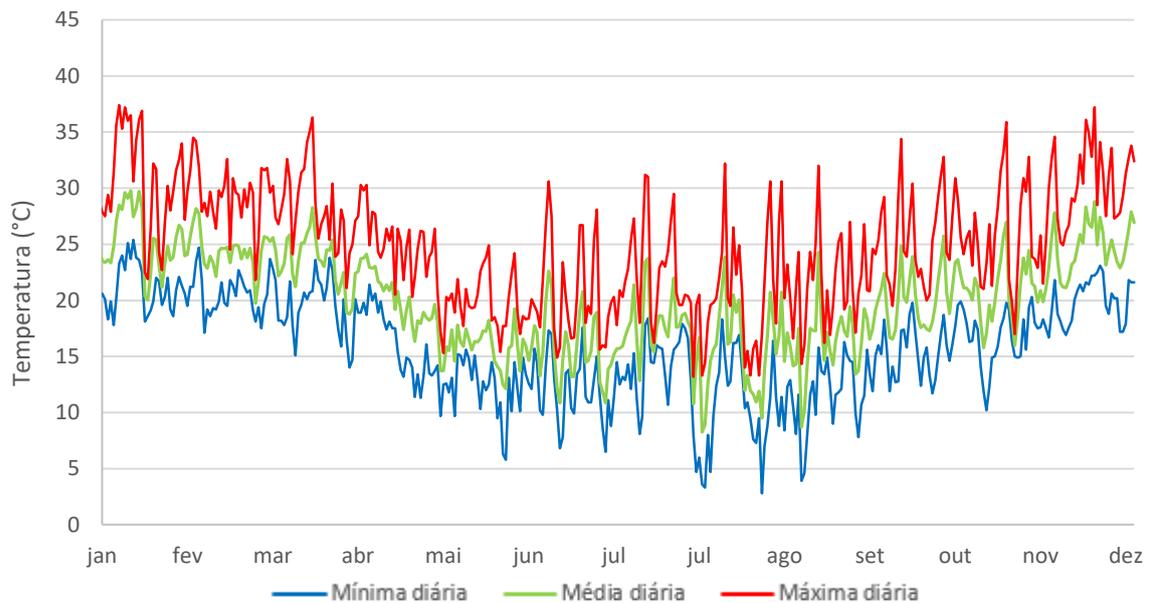


Figura 29: Temperaturas do arquivo climático INMET2016 para Porto Alegre.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de LABEEE, 2016)

5.2 GEOLOGIA

As características do terreno influenciam o tipo de GSHP mais apropriado para cada localização. Fatores importantes incluem a presença ou ausência de água, sua profundidade e temperatura, tipo de rochas e a natureza e espessura de camadas de materiais não-consolidados sobre a rocha (ASHRAE, 2011). Embora o uso de águas subterrâneas não seja considerado neste trabalho, sua presença, assim como os tipos de solo e rocha, ainda é determinante para a faixa de condutividade/difusividade térmica que pode ser esperada.

Valores precisos para cada localidade somente podem ser obtidos via ensaios de solo, para os quais perfurações de poços d'água são uma fonte valiosa de informações. Grandes empreendimentos podem encomendar testes térmicos específicos, mas para residências e pequenos negócios, o custo é proibitivo. Contudo, como para estes, os circuitos enterrados costumam ser muito menores, o impacto de incertezas sobre o projeto também é reduzido e um dimensionamento mais conservativo pode ser adotado (ASHRAE, 2011). Mapas geológicos e hidrológicos de agências regulatórias estatais são a principal fonte de informação neste caso, e esta pesquisa segue esta linha, valendo-se de dados da carta geológica de Porto Alegre, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

De acordo com os dados da folha SH.22 (CPRM, 2004), em detalhe na Figura 30, pode ser visto que os principais litotipos na região de Porto Alegre são:

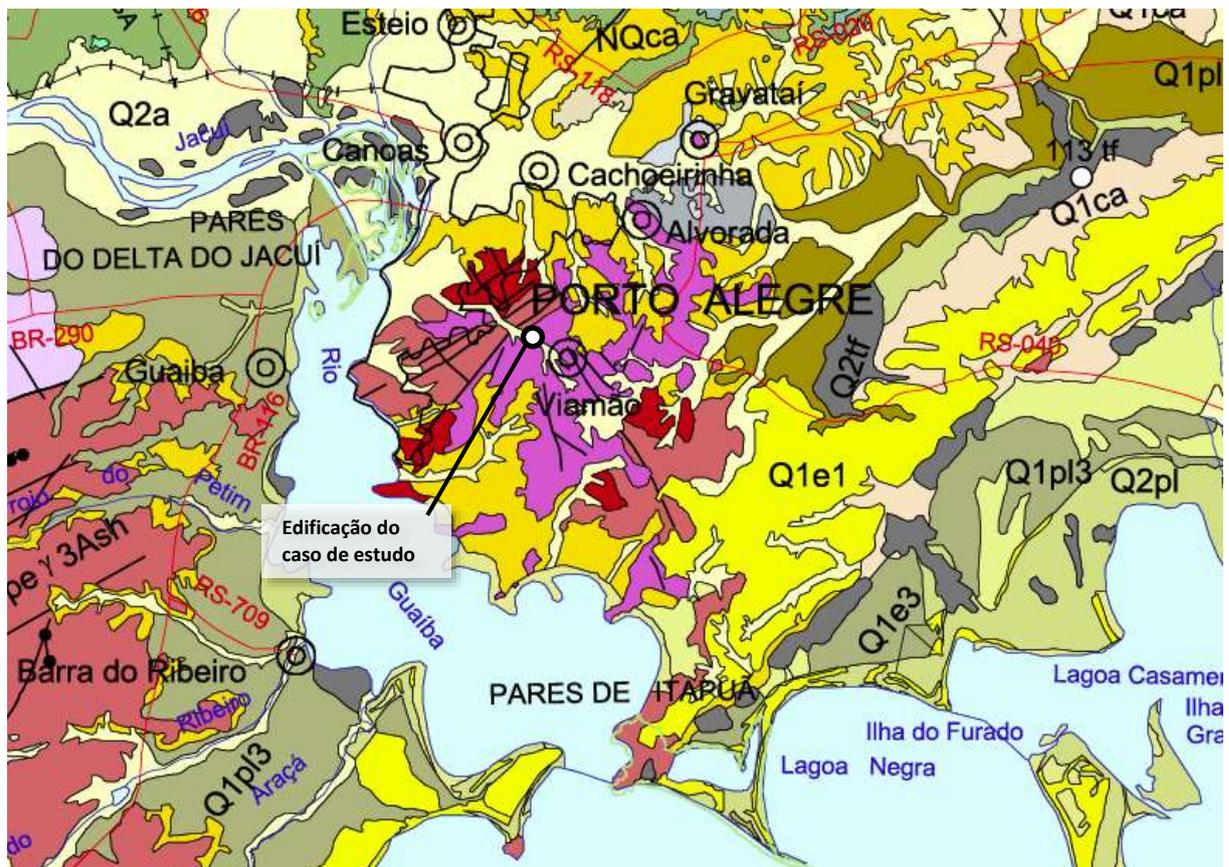


Figura 30: Detalhe da carta geológica de Porto Alegre (SH. 22).

(Adaptado de: CPRM, 2004)

- Depósitos aluviais da barreira holocênica (Q2a): areia grossa a fina, cascalho e sedimento sílico-argiloso, em calhas de rios e planícies de inundação.

- Orógeno magmático neoproterozóico (NP3): magmatismo tardi a pós-orogênico (peγ3): Litofácies Serra do Herval (Ash): sienogranito constituindo *stocks* NE-SW; Litofácies Cerro Grande (Acg): mozogranito porfirítico grosso, engloba enclaves mesocráticos. Magmatismo pré a sinorogênico (peγ11): Complexo granito-gnáissico Pinheiro Machado (pma1): domínio de metagranitóide porfirítico com foliação marcante e deformação semiplástica; granito granodiorítico a monzogranítico com foliação proeminente, contendo abundantes septos de ortognaisses.
- Depósitos colúvio-aluviais (NQCα): conglomerado, diamictito, arenito conglomerático, arenito e lamito; maciço ou com estratificação acanalada.

O caso de referência (detalhado na Seção 5.4) está localizado na área NP3peγ, perto da fronteira entre 3Ash e 11pma1, e muito perto do Arroio Dilúvio e seus depósitos Q2a. A partir destes dados e de consultas com companhias de perfuração com experiência na área, o solo é estimado como uma camada superficial muito úmida de depósitos aluviais, areia grossa a fina e sedimentos de siltito, limo e arenito. Não muito abaixo, algumas vezes a menos de 10 m de profundidade, encontra-se um substrato rochoso ígneo, principalmente granito e gnaisse. Esta premissa foi utilizada para as características do solo neste trabalho. É essencial se ter em mente também que, de acordo com os empreiteiros consultados, os custos de perfuração disparam quando o substrato rochoso é alcançado, devido aos equipamentos especiais e o esforço extra que se tornam necessários.

Para o projeto de trocadores geotérmicos, as propriedades do solo necessárias são: massa específica, ρ_g , condutividade térmica, k_g , e difusividade térmica, α_g . Para o projeto de grandes sistemas de GSHPs, é bastante recomendável que estas propriedades sejam obtidas por testes térmicos no solo local. Para fins residenciais e pequenos comércios, porém, o custo de um teste térmico é difícil de ser justificado (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014) e valores conservativos podem ser estimados a partir de cartas geológicas com bons resultados.

Caracterizado o solo, as propriedades térmicas foram estimadas a partir de tabelas gerais de Kavanaugh & Rafferty (2014), *ASHRAE Handbook - HVAC Applications* (2011) e a referência do *Ground Loop Design* (2016). Estas fontes foram consistentes entre si, fornecendo valores para solos em função do tamanho da partícula (areias ou argilas, Tabela 13) e para rochas de acordo com o tipo (Tabela 14). Por interpolação, os seguintes valores foram usados para este trabalho:

Tabela 13: Valores de referência e os adotados para as propriedades do solo raso.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014)

Tamanho das partículas	Seco	15% de umidade		20% de umidade	
	ρ (kg/m ³)	κ (W/m.K)	α (m ² /d)	κ (W/m.K)	α (m ² /d)
Areias (0,075 – 5 mm)	1920	3,29	0,099	-	-
	1600	2,42	0,093	2,68	0,086
	1280	1,56	0,070	1,64	0,066
Argilas (<0,075 mm)	1920	1,64	0,051	-	-
	1600	1,13	0,039	1,21	0,045
	1280	0,81	0,037	0,87	0,034
Adotadas para o solo raso	$\rho_g = 1600$ kg/m³, $k_g = 2,5$ W/m.K, $\alpha_g = 0,08$ m²/d				

Tabela 14: Valores de referência e os adotados para as propriedades do solo profundo.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014; GLD, 2016)

Tipo de rocha	ρ (kg/m ³)	κ (W/m.K)	α (m ² /d)
Granito (10% quartzo)	2640	2,3-3,3	0,084-0,12
Granito (25% quartzo)	2640	2,6-3,6	0,093-0,13
Arenito	2560-2720	2,1-3,5	0,065-0,11
Gnaisse	2560-2800	2,3-3,5	0,084-0,11
Sólido pesado, saturado	3200	2,42	0,078
Solo pesado, úmido	2100	1,30	0,056
Solo leve, úmido	1600	0,87	0,045
Adotadas para o solo profundo	$\rho_g = 2640$ kg/m³, $k_g = 3,1$ W/m.K, $\alpha_g = 0,08$ m²/d		

Na falta de medições diretas locais, o perfil de temperaturas do solo pode ser estimado a partir dos registros climáticos locais, através de modelos de difusividade térmica e correlações empíricas (ASHRAE, 2011). O arquivo INMET2016 selecionado já fornece essas temperaturas, com médias mensais para as profundidades de 0,5 m, 2 m e 4 m (Figura 31). Os valores para a profundidade de 0,5 m foram usados como a temperatura natural do solo para as trocas de calor com o piso, enquanto os valores para 2 m foram usados para o projeto do circuito enterrado horizontal. Para o projeto do circuito vertical, foi usada um valor constante (a média anual para 4 m de profundidade, 20 °C).

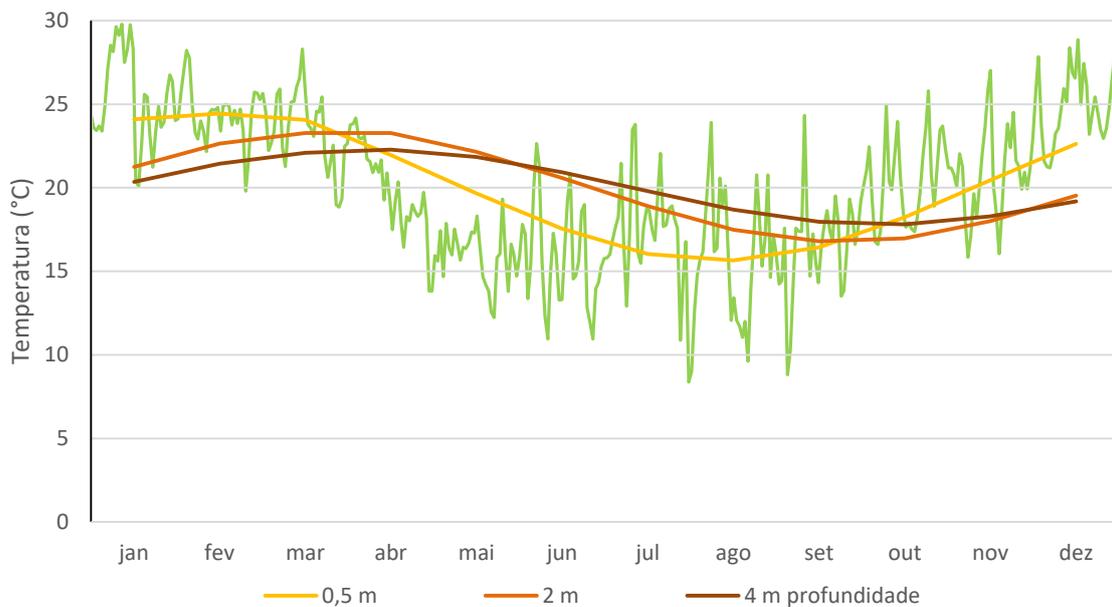


Figura 31: Temperaturas do solo pelo arquivo climático INMET2016 para Porto Alegre.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de LABEEE, 2016)

5.3 REQUISITOS DE USO E CONFORTO

A história da eficiência energética de edificações no Brasil é relativamente curta. A primeira lei de eficiência energética no País (Lei Nº 10295) foi aprovada e publicada somente em 2001 (BRASIL, 2001), pressionada pela crise energética que havia ocorrido no mesmo ano. Após anos de estudos e investimento, o primeiro Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) foi lançado em 2009 e, em 2010, o equivalente Regulamento para Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2010). Finalmente, em 2013, foi publicada a primeira Norma de Desempenho de Edificações (NBR 15575) (ABNT, 2013).

Embora esses padrões tenham sido um grande avanço, eles ainda enfrentam críticas de especialistas na área (BODACH; HAMHABER, 2010). Para o setor residencial, os requisitos ainda são baixos e não são obrigatórios, e nenhum deles lida diretamente com conforto térmico. Em um ranking de desempenho inferior, médio e superior, a NBR 15575 exige apenas que as temperaturas internas da edificação sejam menores ou maiores dentro de uma certa faixa em relação às temperaturas exteriores quando ela for exposta a um dia típico de verão ou inverno.

Se as temperaturas resultantes em condições reais podem ser consideradas confortáveis pelos usuários, isto não é levado em consideração.

No entanto, para se estimar as demandas energéticas de uma edificação, é necessária uma definição objetiva de conforto térmico. Na falta de uma definição oficial brasileira, muitos estudos adotam a ASHRAE Standard 55 (2010). Outra referência clássica é a carta bioclimática de Givoni (1992), que adapta as cartas da ASHRAE e de Olyay (1963) para o uso em edificações não-condicionadas (especialmente em países em desenvolvimento de clima quente). Givoni “esticou” as definições anteriores de zona de conforto térmico considerando os efeitos de aclimatização, ventilação, resfriamento evaporativo e inércia térmica de uma edificação de grande massa no conforto do usuário (GIVONI, 1992). Contudo, o resfriamento evaporativo tem pouco uso em áreas de umidade elevada como no Rio Grande do Sul, enquanto uma massa elevada para a inércia não é uma característica usual da arquitetura contemporânea.

Provavelmente com isto em mente, a NBR 15220 (2005) adaptou a carta de Givoni à realidade brasileira (Figura 32). Embora o foco em si seja guiar estratégias para residências no Brasil através da sua classificação em oito zonas bioclimáticas, esta norma inclui uma definição de conforto térmico, a qual leva a umidade mais em consideração do que as anteriores.

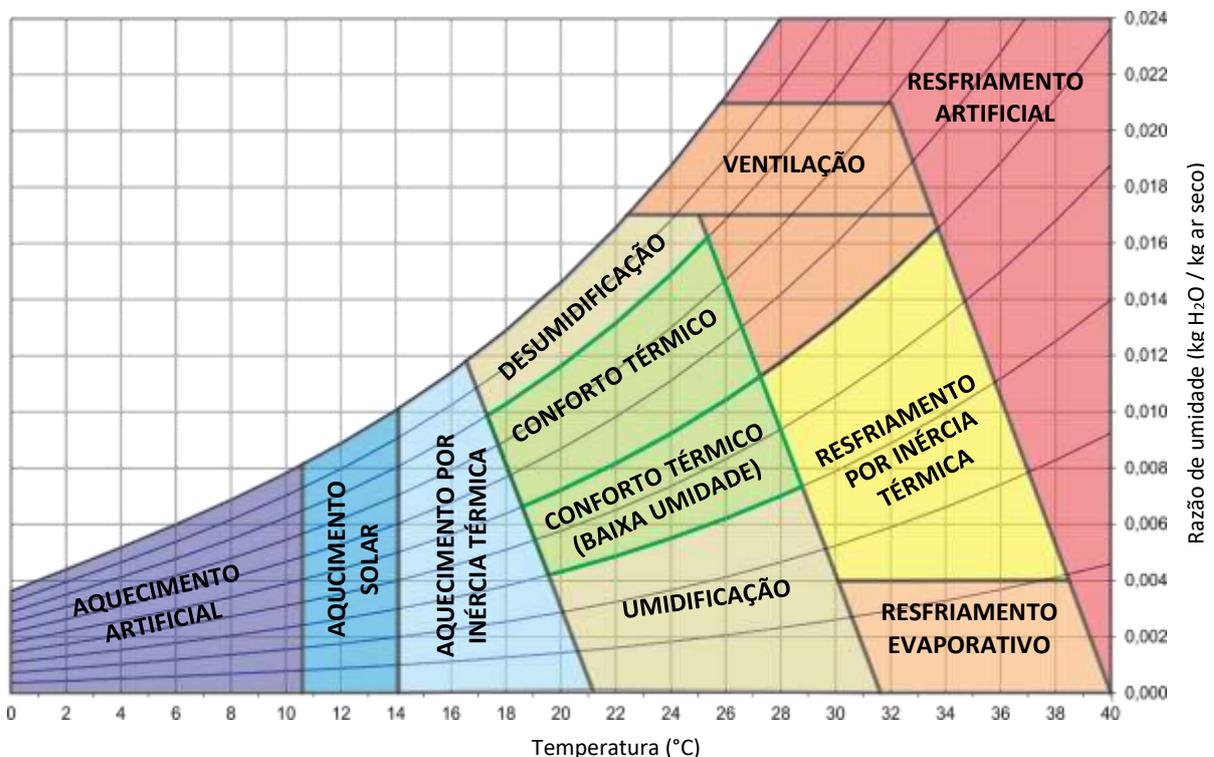


Figura 32: Carta bioclimática adaptada da NBR 15220.

(Adaptado de: ABNT, 2005)

A Figura 33 compara as diferentes definições de conforto térmico mencionadas em uma carta psicrométrica, juntamente com as médias horárias de temperatura e umidade de Porto Alegre, de acordo com os dados do INMET de 2000 a 2010:

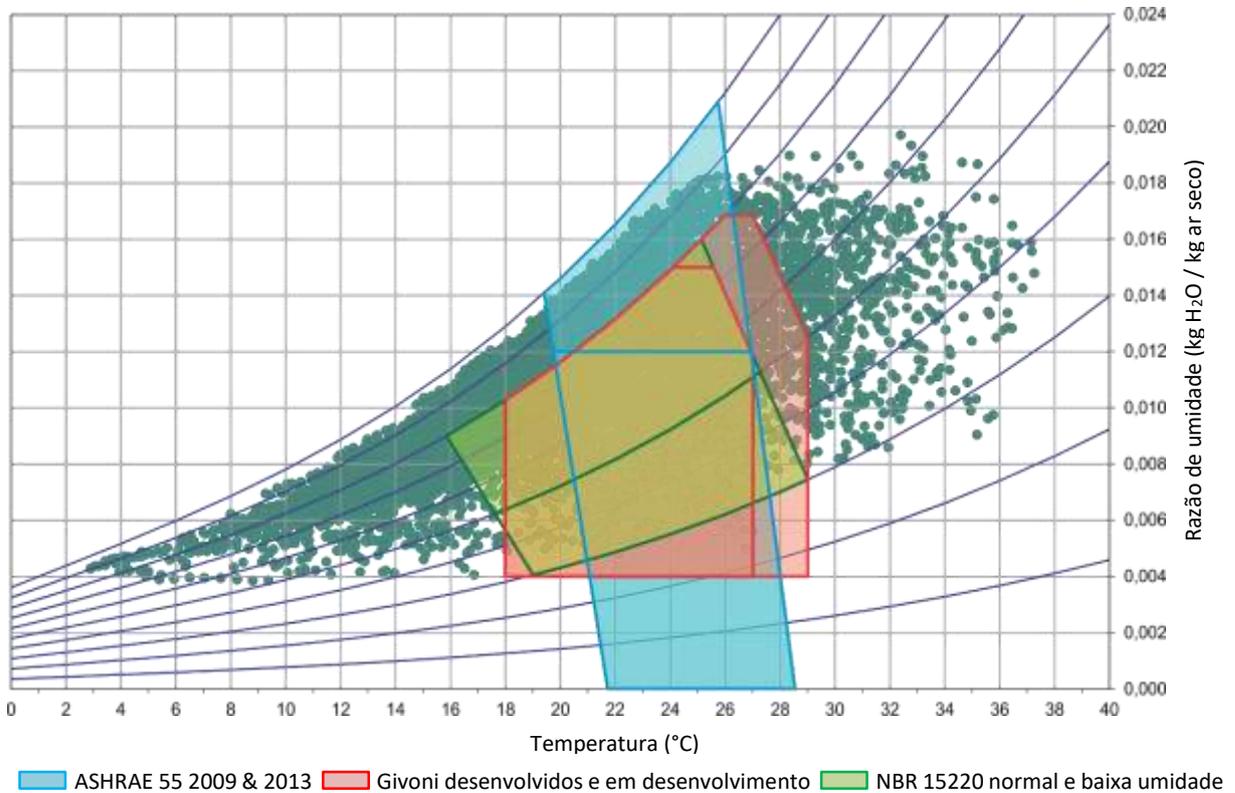


Figura 33: Comparação de definições de conforto térmico para o clima de Porto Alegre.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de ABNT, 2005; ASHRAE, 2010; GIVONI, 1992; INMET, 2016)

Como pode ser visto, as diferentes definições de conforto térmico podem levar a demandas bem diferentes para aquecimento e resfriamento (Tabela 15). O padrão da ASHRAE é notavelmente mais exigente, considerando apenas 38,3% das condições naturais de Porto Alegre como confortáveis (e apenas 12,9%, se considerada a umidade). Ele também tende a ser muito mais intolerante quanto ao frio, tornando o aquecimento de longe a maior demanda. Enquanto isso, a carta de Roriz na NBR 15220 leva a uma tolerância muito maior de conforto, 63,3% do tempo, e a um maior balanceamento – o que é mais de acordo com a prática de Porto Alegre, onde ventiladores e aparelhos de ar condicionados tendem a ser mais comuns e utilizados do que aquecedores. É relevante notar que todas as definições concordam que uma umidade relativa acima de 80% é desconfortável (exceto a revisão de 2013 da ASHRAE 55, que não possui limites de umidade). Contudo, pelos dados do arquivo climático, Porto Alegre passa mais de 42% do ano nesta condição.

Tabela 15: Período anual em conforto térmico para Porto Alegre.

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de INMET, 2016)

Definição de conforto térmico ^(a)	frio	Confortável		quente	úmido	seco
		apenas por T ^(b)	por T e umidade			
Givoni (países desenvolvidos)	36,6%	49,2%	27,5%	14,2%	42,4%	0,2%
Givoni (quentes em desenvolvimento)	36,6%	56,0%	33,8%	7,5%	42,4%	0,2%
NBR 15220	23,0%	63,3%	32,7%	13,7%	42,4%	0,2%
ASHRAE 2009 ^(c)	50,1%	38,3%	12,9%	11,6%	37,1%	-
ASHRAE 2013 ^(c)	50,1%	38,3%	-	11,6%	-	-

(a) Conforto térmico em relação ao ano do arquivo climático INMET2000-2010.

(b) “apenas por T” inclui como confortáveis condições que seriam excluídas pelo nível de umidade.

(c) *Clothing thermal resistance* = 1 clo. ASHRAE 2009 possui um limite superior de 0,012 kg H₂O/kg de ar seco, enquanto a ASHRAE 2013 não possui nenhuma.

Na falta de uma regulação oficial de uma zona de conforto térmico no Brasil, a definição da faixa para as simulações energéticas será sempre arbitrária. O RTQ-R preconiza uma faixa bastante estreita de 22 a 24 °C para simulações, a qual parece desconsiderar a capacidade de adaptação do corpo humano à variação de temperatura e leva a gastos muito maiores com energia. Exatamente por estes motivos, há uma tendência atual em se trabalhar com modelos adaptativos com *setpoints* flutuantes de temperatura, o que em si já é uma grande área de pesquisa em conforto térmico. Para os fins desta pesquisa, porém, manteve-se uma definição simplificada de faixa de conforto térmico e foi adotado que o sistema operará de modo a manter o ambiente na faixa de temperatura entre 18 e 25 °C – a qual representa a concordância entre as definições de Givoni e a carta da NBR 15220 para uma condição de alta umidade. Posteriormente, porém, foi analisado também o impacto de diferentes definições de conforto térmico nas necessidades de condicionamento da edificação e nos ganhos de energia.

As outras configurações adotadas para a simulação energética, ou seja, o padrão de ocupação e os ganhos internos, foram basicamente as definidas pelo RTQ-R (INMETRO, 2010), mas adaptadas ao objetivo desta pesquisa. A principal modificação foi a de controlar a temperatura apenas por condicionamento artificial, uma vez que o foco deste trabalho é a comparação entre duas tecnologias de bombas de calor.

- Ventilação natural: Todas as aberturas externas foram mantidas fechadas ao longo de todo o ano e ventilação natural não foi considerada. Infiltrações de ar, porém, são parte do modelo e são afetadas pela velocidade e direção do vento conforme os

dados climáticos. Coeficientes de descarga e fluxo de ar para as aberturas consideram ausência de vedações e seguem os valores recomendados por Liddament (1986). Para a calibração, o coeficiente de rugosidade do ambiente o considera como um “campo”, como realmente é no PCA, não uma zona urbana.

- Padrão de ocupação: Uma família de quatro pessoas, duas das quais sempre se encontram em casa, e duas ausentes entre 08:00 e 18:00. Taxas metabólicas foram tomadas do ASHRAE 55, considerando uma área de pele média de 1,80 m². O sistema de iluminação artificial segue os períodos e potências pela RTQ-R. Um forno a gás é usado para cozimento e a principal fonte elétrica de calor é o refrigerador, sempre ligado. Dias úteis e fins de semana seguem o mesmo padrão.

Tabela 16: Padrão de ocupação.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Horário	Dormitórios (cada um entre 2)			Sala de estar/cozinha				
	Número de pessoas	Taxa de atividade (W)	Luzes (W/m ²)	Número de pessoas	Taxa de atividade (W)	Luzes (W/m ²)	Fontes elétricas (W)	Gás (W)
00:00-06:00	2	2 x 81	-	-	-	-	54	-
06:00-07:00	2	2 x 81	5	-	-	-	54	-
07:00-08:00	-	-	-	4	4 x 171	-	54	825
08:00-11:00	-	-	-	2	2 x 108	-	54	-
11:00-12:00	-	-	-	2	2 x 171	-	54	1100
12:00-13:00	-	-	-	2	2 x 171	-	54	-
13:00-17:00	-	-	-	2	2 x 108	-	54	-
17:00-18:00	-	-	-	2	2 x 108	6	54	-
18:00-19:00	-	-	-	4	4 x 171	6	54	1100
19:00-20:00	-	-	-	4	4 x 108	6	54	-
20:00-21:00	1	1 x 81	5	2	2 x 108	6	54	-
21:00-22:00	2	2 x 81	5	-	-	-	54	-
22:00-24:00	2	2 x 81	-	-	-	-	54	-

- Zonas condicionadas: Embora o RTQ-R peça por uma única zona térmica, o PCA foi modelado como seis zonas para permitir uma melhor reprodução da edificação real. Contudo, estas zonas foram modeladas com um fluxo interno de ar entre si, como na situação real, o que reproduz o mesmo efeito. O banheiro, embora não

sendo um espaço com uso por um período extensivo de tempo, foi incluído como uma área condicionada. Para o projeto do sistema de HVAC virtual, cada zona possui seu próprio termostato, e todas devem atender sempre à faixa de 18 a 25 °C.

- Aquecimento de água: Estipular que esta demanda seja também atendida pelo sistema de HVAC é uma prática comum em países mais frios e estende a eficiência energética de bombas de calor para o aquecimento de água. Embora adotar esta prática neste trabalho pudesse favorecer a viabilidade econômica de uma GSHP (especialmente quando comparado a chuveiros elétricos), esta demanda não é parte do condicionamento de ar da edificação e por isso não é incluída.

5.4 EDIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA

O Projeto Alvorada original começou em 1997, em uma parceria entre o Município de Alvorada e a UFRGS, através do NORIE e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Enquanto habitações de interesse social destinadas a populações de baixa renda geralmente estão preocupadas somente em minimizar os custos, este projeto procurou fazer o máximo com os recursos disponíveis. O objetivo era desenvolver um protótipo que levasse em conta as características climáticas locais para um desempenho superior, ao mesmo tempo minimizando o uso de materiais poluentes, tóxicos ou com alto conteúdo energético (MORELLO; SATTLER, 2006). Como resultado o Protótipo Casa Alvorada (PCA) foi construído dentro de um dos *campi* da UFRGS, entre 2001 e 2003.

O conceito do PCA (Figura 34) incluía diversas estratégias de baixo custo para aumentar seu desempenho e reduzir o impacto ambiental. Embora algumas destas estratégias ainda não tenham sido implementadas, o envelope da construção foi concluído em 2003 e, desde então, a casa serviu a diversas pesquisas no NORIE (SATTLER, 2007). Como a casa foi desde o início otimizada para ter um baixo custo e incorporar materiais e estilos comuns à região, ela é fácil de ser reproduzida em larga escala e de ter aceitação entre populações locais. Somado à grande quantidade de dados científicos produzidos ao longo do tempo, o PCA qualifica-se bem para ser um caso de referência para esta pesquisa.



Figura 34: Conceito original do PCA para o protótipo na UFRGS.

(Fonte: SATTLER, 2007)

O PCA tem uma área construída de aproximadamente 48 m², composta por dois dormitórios, uma sala de estar/cozinha integrada, um banheiro, uma varanda externa e uma pequena área de serviço (Figura 35), correspondendo às necessidades básicas de uma família de quatro pessoas. A casa foi projetada com diversas estratégias de condicionamento passivo térmico, como orientação solar apropriada, sombreamento por vegetação natural e resfriamento convectivo do telhado. Uma descrição mais completa dos materiais, dimensões e subsistemas da casa pode ser vista no Apêndice A.

Entre as diversas pesquisas efetuadas sobre o PCA, a mais relevante para o presente estudo é a de Morello (2005), a qual avaliou o desempenho térmico do PCA através do monitoramento contínuo de variáveis climáticas fora e dentro da casa durante um ano (maio de 2003 a maio de 2004). A casa foi mantida permanentemente fechada durante todo o experimento, de modo a não haver influência de fatores como ventilação natural, ganhos de calor internos ou padrão de ocupação. Estes dados de medição foram usados para calibrar o modelo de simulação e, desta maneira, fornecer resultados de demanda energética mais confiáveis.

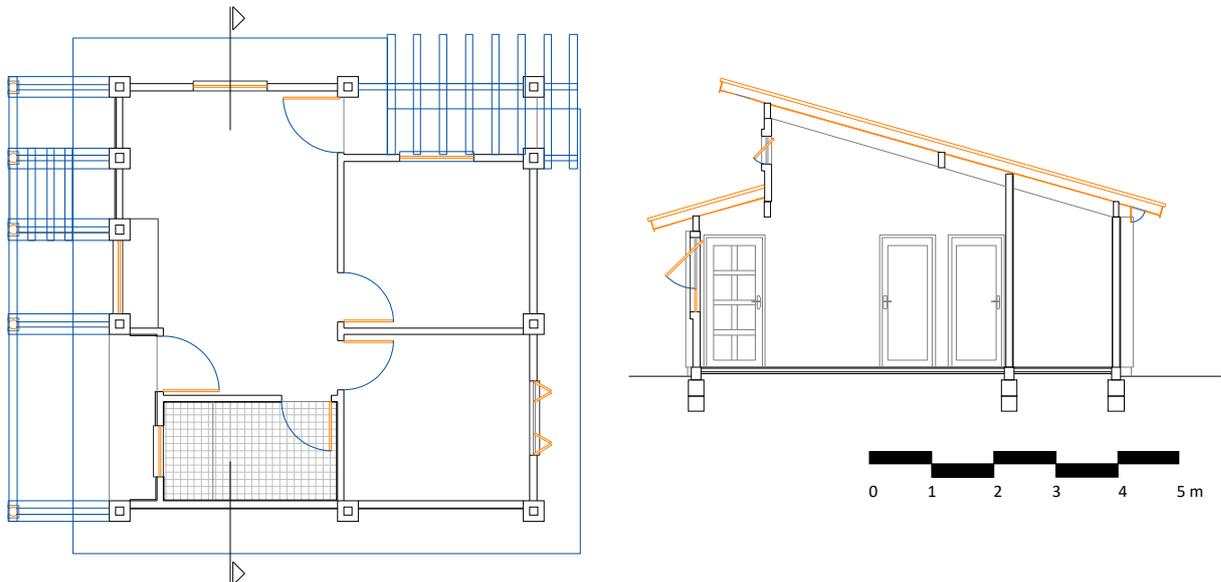


Figura 35: Planta-baixa e corte básicos do PCA.

(Adaptado de: MORELLO; SATTLER, 2006)

Aplicando-se a faixa de conforto térmico de 18 a 25 °C estipulada neste trabalho, foi verificado o desempenho natural do PCA antes de qualquer estratégia de condicionamento de ar. Devido ao seu projeto mais otimizado, pode ser visto que o envelope do PCA por si só já melhorou significativamente o conforto térmico interno comparado às condições ambientais (Tabela 17), de 39,8% para 52,9% do tempo medido. Por quase metade do tempo, porém o PCA ainda não atende à faixa de conforto térmico estabelecida neste trabalho.

Tabela 17: Conforto térmico do PCA sem condicionamento de ar (mai 2003 – mai 2004).

(Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de MORELLO, 2005)

Ponto de medição ^(a)	Frio (T < 18 °C)	Confortável por T	Quente (T > 25 °C)	Mín/Máx T (°C)	Muito úmido (U.R. > 80%)
Ambiente externo (8412 h) ^(b)	3795 h (45,1%)	3348 h (39,8%)	1269 h (15,1%)	0,5 / 34,8	5812 h (69,1%)
Interior PCA (8448 h) ^(c)	2337 h (27,6%)	4466 h (52,9%)	1645 h (19,5%)	8,7 / 30,5	832 h (9,9%)

(a) 8784 h de medição (2004 foi um ano bissexto)

(b) 352 h de dados entre 29 de outubro e 13 de novembro (primavera) foram perdidos

(c) 336 h de dados espalhados foram perdidos ou descartados devido a interferências

Uma análise de desempenho térmico mais completa de uma edificação, porém, deve considerar o efeito do usuário sobre os ganhos internos de calor, algo que nunca foi feita experimentalmente no PCA. Felizmente, isto pode ser estimado por meio de simulações computacionais, o que foi um dos passos seguintes após a modelagem e a calibração do protótipo.

5.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

5.5.1 Modelagem da edificação e calibração

O processo de calibração procurou reproduzir o experimento de Morello (2006) dentro do ambiente de simulação energética de edificações, usando seus dados climáticos e ajustando o modelo até que as condições simuladas no interior fossem próximas aos valores medidos.

Neste experimento, os dados climáticos foram obtidos a partir de uma estação meteorológica monitorada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, localizada a cerca de 500 m do Protótipo Alvorada. Para os dados internos, um analisador ambiental foi utilizado, instalado no centro do espaço da sala de estar/cozinha, a 1,10 m sobre o piso. A medição em si ocorreu no período entre o dia 12 de maio de 2003 e o dia 12 de maio de 2004.

Entretanto, para que os dados climáticos daquela pesquisa (originalmente em uma planilha de Excel) pudessem ser utilizados em simulação no EnergyPlus, eles primeiramente necessitaram ser convertidos em um arquivo EPW que pudesse ser compreendido pelo programa. Isto envolveu não somente uma mudança de formato, mas também lidar com a falta de parte dos dados. Devido a uma falha da estação do IPH, nenhum dado foi coletado entre 29 de outubro de 13 de novembro, de modo que o arquivo climático e a calibração foram programados para rodar a simulação até 28 de outubro. Felizmente, esta perda não foi um problema, uma vez que as semanas utilizadas como referência (a mais quente e a mais fria do ano) estavam intactas. Outra situação encontrada foi que o arquivo EPW requer alguns tipos de dados climáticos que não são medidos pelo IPH – nominalmente, alguns tipos de radiação solar. Isto foi resolvido completando-se os valores em falta com os correspondentes horários do arquivo INMET2016 (antes deste processo, verificou-se que os novos valores não diferiam

muito do tipo de radiação solar medida). O conjunto resultante de dados foi reunido então em uma nova planilha de Excel, convertida em um arquivo CSV e, finalmente, em um EPW.

A etapa seguinte foi a modelagem da edificação. Como já mencionado, o *EnergyPlus v. 8.6.0* foi usado para modelar o PCA e para a maioria das simulações energéticas. O EnergyPlus é um ambiente de simulação robusto e permite um grande nível de customização e de especificação, mas não é de fácil uso por um iniciante. Por isto, alguns outros aplicativos foram desenvolvidos para trabalhar sobre o EnergyPlus, sendo um dos mais populares atualmente o *OpenStudio*. Para este trabalho, foi utilizado um predecessor do OpenStudio, o *Legacy OpenStudio v.1.0.14 plugin* para *SketchUp*, uma vez que, exceto pela modelagem geométrica, todo o restante da configuração foi feito diretamente no EnergyPlus, o que permitiu lidar com algumas dificuldades técnicas no caminho.

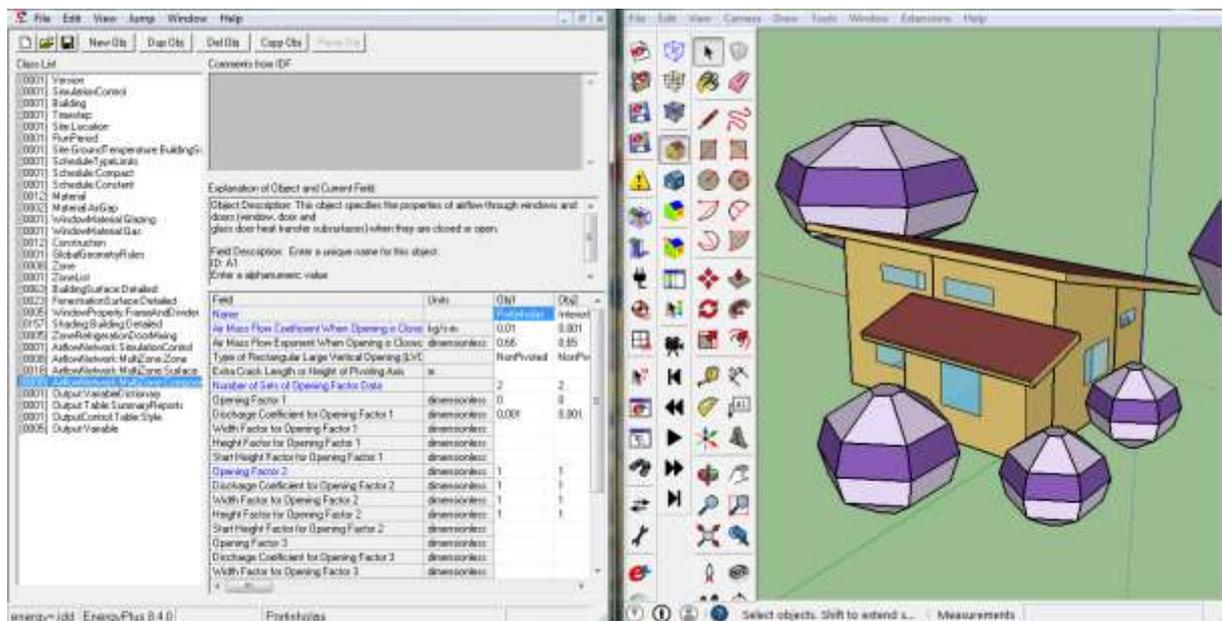


Figura 36: Ambiente para modelagem e simulação da edificação.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Tanto o *OpenStudio* como sua versão *Legacy* carregam as limitações de modelagem do EnergyPlus, sendo uma delas a de que todas as superfícies em uma mesma zona devem ser convexas entre si, ou seja, todas as superfícies devem ser “visíveis” para as demais. Eles ainda acrescentam outras limitações, pois os automatismos projetados para facilitar a tradução da geometria criada para objetos do EnergyPlus frequentemente podem gerar erros à medida em que a geometria se torna muito complexa. A prática normal para lidar com esta limitação é simplificar o modelo ao mínimo necessário ainda capaz de fornecer resultados úteis. No

entanto, para aprimorar a calibração, decidiu-se por não acrescentar uma imprecisão extra com esta simplificação. Assim, a opção tomada foi por um processo de modelagem mais trabalhoso, porém mais preciso.

A modelagem começou com uma simples caixa com o mesmo volume do PCA. As propriedades térmicas dos elementos construtivos foram definidas especificando-se cada camada de material com suas propriedades individuais, deixando ao programa calcular as transmitâncias finais (um método mais detalhado do que o usado pela NBR 15575 ou a certificação RTQ-R). Progressivamente, todos os espaços foram divididos em zonas separadas, sendo que a sala de estar/cozinha foi dividida em três para acomodar as não-convexidades (Figura 37). À medida que a modelagem evoluía, incluindo os tetos inclinados, as coordenadas das superfícies eram verificadas diretamente no EnergyPlus, procurando-se e corrigindo-se os erros. De volta ao SketchUp, os resultados eram mais uma vez verificados para se certificar de que eram compreendidos pelo OpenStudio. Este processo iterativo continuou até que todos os elementos relevantes da edificação e do entorno fossem apropriadamente incorporados.

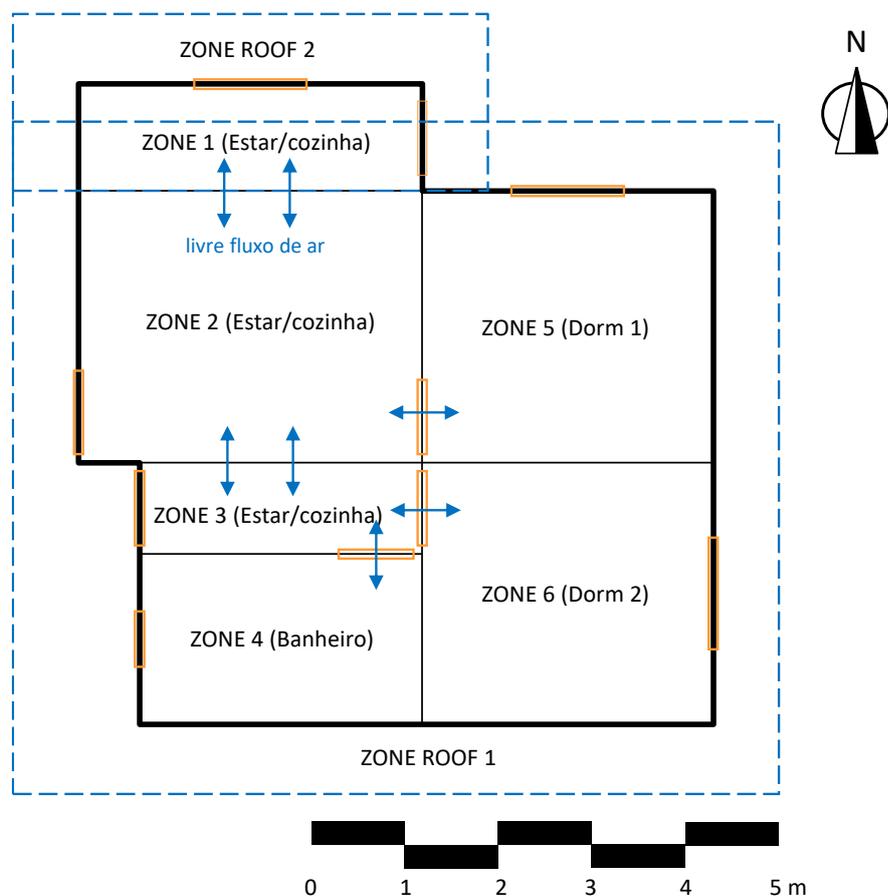


Figura 37: Modelagem da edificação em zonas térmicas.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

A cada progressão no detalhamento, uma simulação energética era rodada para testar se a temperatura de bulbo seco interna (a principal variável controlada) se aproximava da medida pelo experimento de Morello. Como no PCA os telhados são projetados para permitir resfriamento por convecção de ar induzida, eles foram modelados como zonas, não como superfícies como na prática usual, a fim de que este efeito pudesse ser simulado. Reproduzindo o experimento real, nenhum ganho interno foi considerado, as portas e janelas externas foram mantidas fechadas todo o tempo e, as internas, foram mantidas sempre abertas. A calibração também reproduziu o período em que as portinholas do telhado foram mantidas abertas (11 de novembro de 2003 a 11 de maio de 2004).

Os passos finais, mas essenciais foram: a incorporação de um modelo de ar complexo para estimar as infiltrações devidas a diferenciais de pressão e ao vento; o ajuste do perfil do entorno; e a modelagem das árvores mais próximas como elementos de sombra (Figura 38).

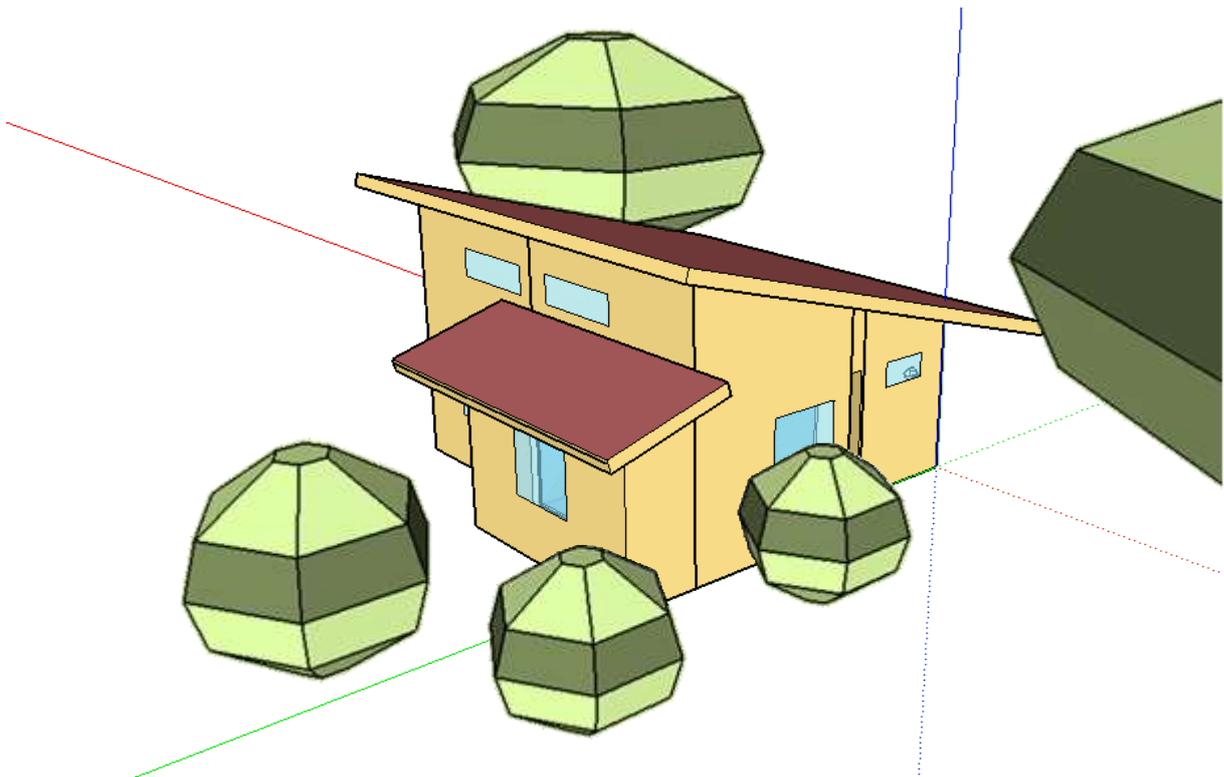


Figura 38: Modelo volumétrico da edificação como visto pelo SketchUp.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Os gráficos seguintes mostram as temperaturas internas simuladas (Zonas 1 a 6) no modelo calibrado, comparadas com as medidas reais de Morello (2005). Duas semanas são mostradas em detalhe: uma do mês com as temperaturas mais quentes registradas, janeiro

(Figura 39), e outra do mês mais frio, julho (Figura 40). Como pode ser visto, o modelo da edificação foi capaz de reproduzir com grande precisão as temperaturas medidas dentro do protótipo. Pode ser visto também, através da divisão do modelo em seis zonas, que há uma boa mistura do ar e as temperaturas se apresentam bem homogêneas. O desvio máximo entre as temperaturas simuladas e as medidas em janeiro e julho foi de 3,8 °C, embora o desvio médio ao longo de todo o período simulado tenha sido de apenas 1,07 °C.

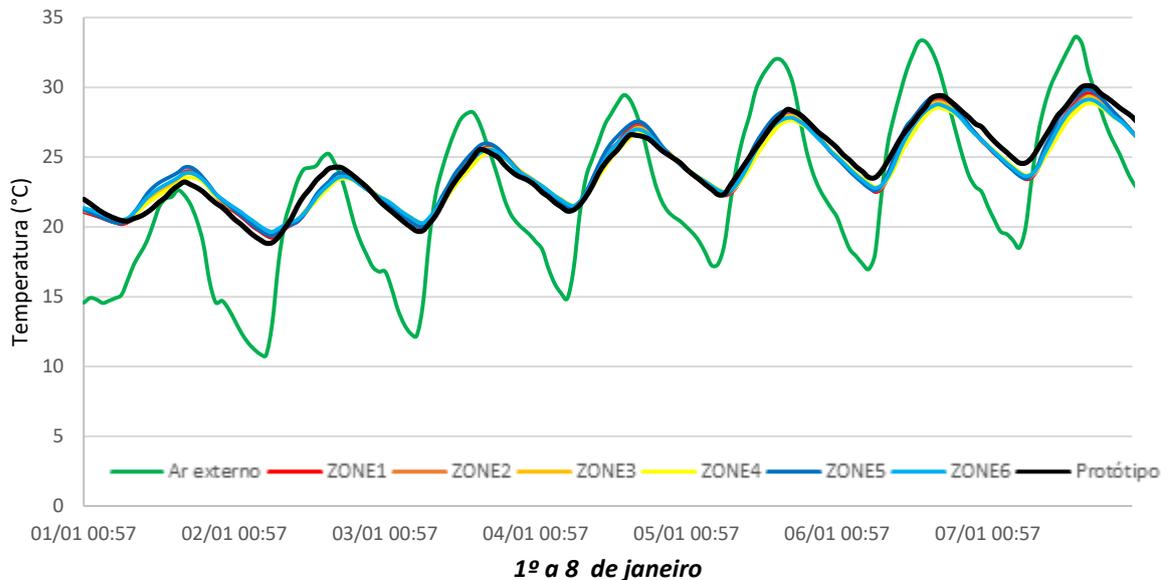


Figura 39: Modelo simulado calibrado e temperaturas medidas: semana de verão.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

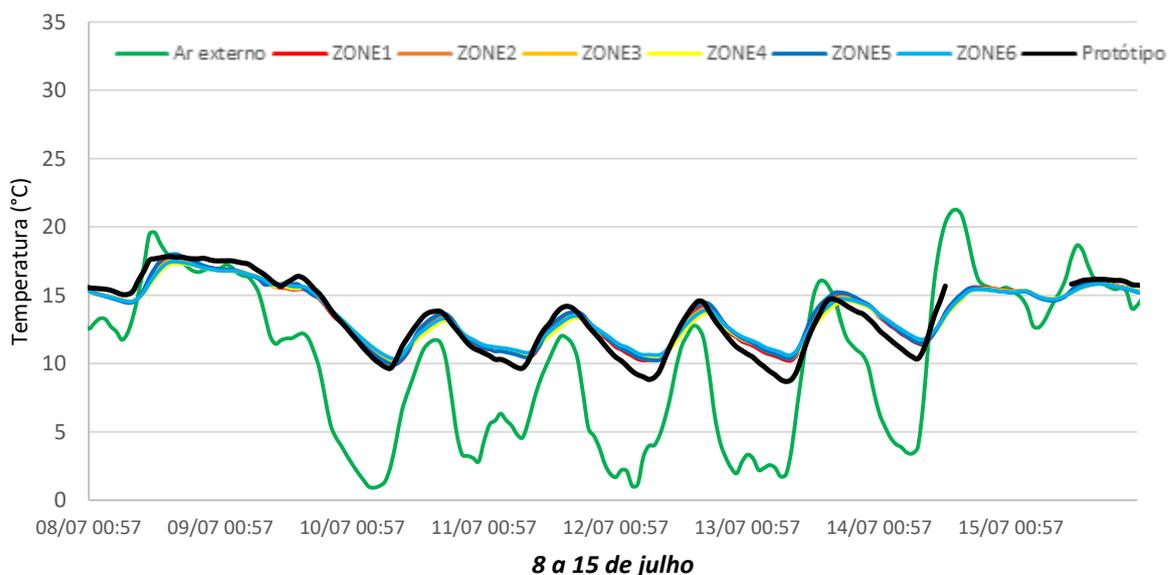


Figura 40: Modelo simulado calibrado e temperaturas medidas: semana de inverno.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

5.5.2 Simulação energética da edificação

O próximo passo foi a simulação do caso de referência em si, incorporando-se os dados do arquivo climático INMET2016 e os ganhos internos. Os passos para este ajuste no simulador foram:

1. Conforto térmico em condições naturais: O modelo calibrado do PCA, agora rodado com os dados climáticos do INMET2016 para todo um ano. Com ele, foi possível estimar qual seria o desempenho natural da casa antes de um condicionamento térmico (Figuras 41 e 42). A temperatura da Zona 2 (maioria da área da sala de estar/cozinha) foi usada como referência. O PCA demonstrou um bom desempenho no verão, apresentando uma temperatura interna até 6 °C menor do que a externa durante os maiores picos de calor. Ainda assim, isto não é suficiente para atingir a zona de conforto térmico sem a ajuda de um sistema de condicionamento ativo. O mesmo acontece durante os picos de frio no inverno.

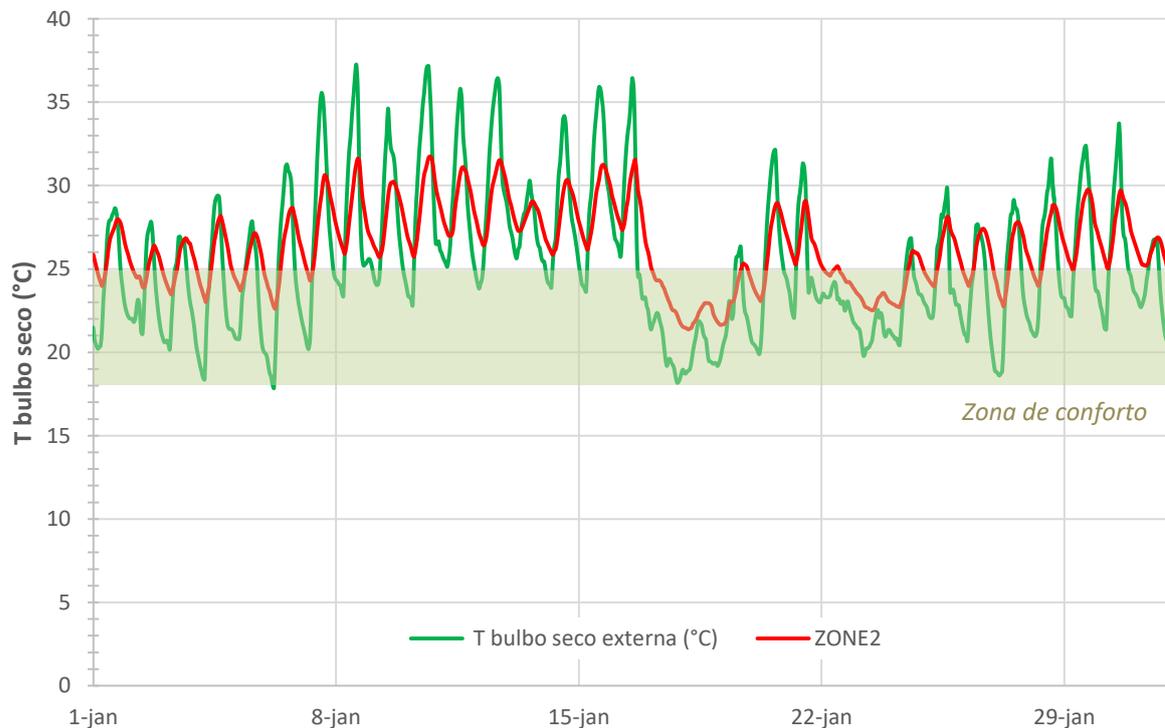


Figura 41: Desempenho térmico da edificação não-condicionada em janeiro.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

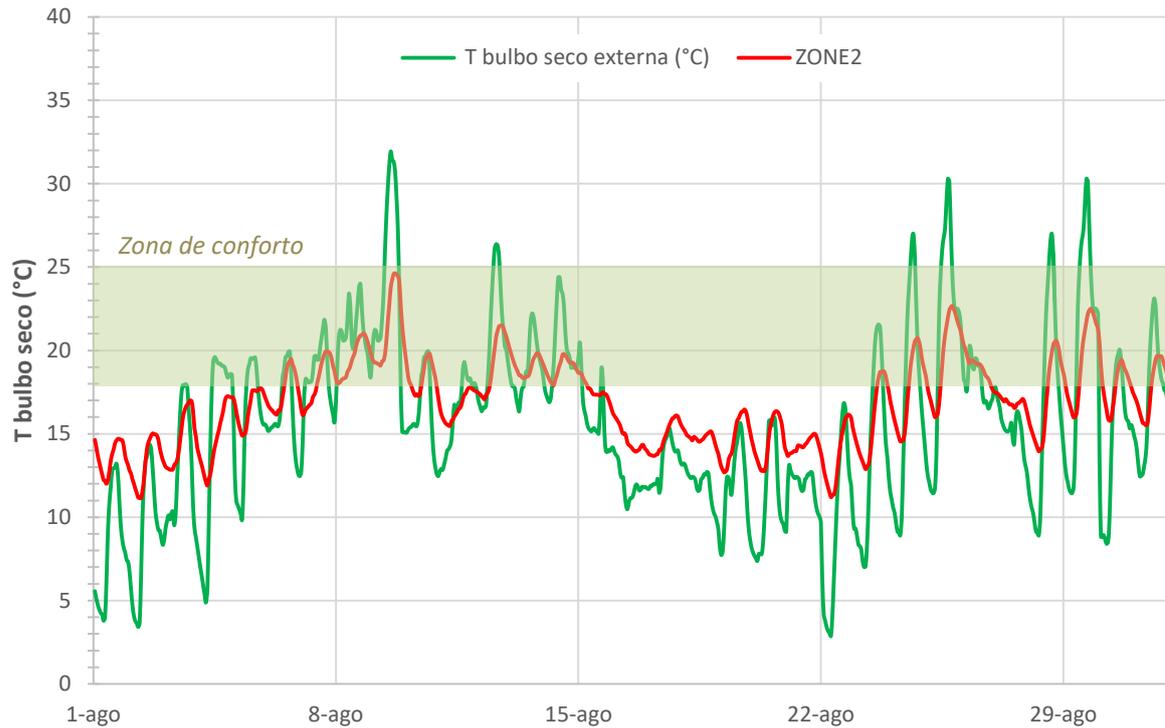


Figura 42: Desempenho térmico da edificação não-condicionada em agosto.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

2. Conforto térmico com ganhos internos: A simulação anterior, adicionada das fontes internas de calor e do padrão de ocupação. Com este passo, foi possível se estimar o desempenho do PCA quando efetivamente ocupado, algo que ainda não foi feito experimentalmente e que era uma das questões do trabalho de Morello (2006). Como mostrado na Tabela 18, o calor extra teve um uma ação considerável em diminuir as horas de frio e aumentar as de calor – um impacto substancial na demanda por resfriamento.

Tabela 18: Impacto dos ganhos internos sobre o conforto térmico não-condicionado.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

	Exterior		Ambiente não-ocupado		Ambiente ocupado		Impacto
Horas frias (< 18 °C)	3203	36,6%	2806	32,0%	2058	23,5%	-27%
Conforto	4001	45,7%	4433	50,6%	4725	53,9%	+7%
Horas quentes (> 25 °C)	1556	17,8%	1521	17,4%	1977	22,6%	+30%

3. Condicionado por *Ideal Loads*: O EnergyPlus possui *templates* para a simulação de diversas configurações de HVAC. Um deles, “*Ideal Loads Air System*”, simula um sistema ideal de ar condicionado que atende a todos os requisitos de carga e não consome nenhuma energia (DOE, 2016). Assim, é possível calcular as cargas de aquecimento e resfriamento, assim como as demandas máximas de energia, mostradas na Tabela 19 e na Figura 43. Pela faixa de conforto adotada, a carga anual de resfriamento (2007 kWh ou 7,23 GJ) estimada foi bem maior do que a de aquecimento (1387,4 kWh ou 4,99 GJ), cerca de 50% maior. Da mesma maneira, a demanda máxima de resfriamento instantânea, 4,05 kW, foi cerca de 30% maior do que a de aquecimento, 3,11 kW. Como esperado, o resfriamento é a demanda que definirá o tamanho da bomba de calor (e do circuito enterrado).

Tabela 19: Cargas de energia para o conforto térmico da edificação.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Cargas de energia (kWh)													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Aquecimento	-	-	-	0,1	114,5	300,4	201,3	482,1	274,4	12,9	1,7	-	1387,4
Resfriamento	645,1	417,3	352,2	36,9	-	-	-	0,3	0,1	27,2	60,4	467,5	2007,0
Demandas de energia médias (W)													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Aquecimento	-	-	-	0,1	154,0	417,2	270,5	648,0	381,1	17,4	2,3	-	158,4
Resfriamento	867,0	621,0	473,4	51,2	-	-	-	0,5	0,1	36,5	83,9	628,3	229,1
Demandas instantâneas máximas													
Aquecimento	22 de agosto:		3.110,79 W = 10.614 BTU/h = 0,88 ton									PLF Ago: 0,2104	
Resfriamento	16 de janeiro:		4.053,08 W = 13.830 BTU/h = 1,15 ton									PLF Jan: 0,2151	

O fator de carga parcial, *PLF*, representa quanto da potência máxima de uma bomba de calor hipotética projetada para a demanda instantânea máxima está sendo utilizado. Valores médios ao redor de 0,2 são típicos para períodos de grande demanda (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014), como em janeiro e agosto, quando a bomba de calor é usada a maioria do tempo.

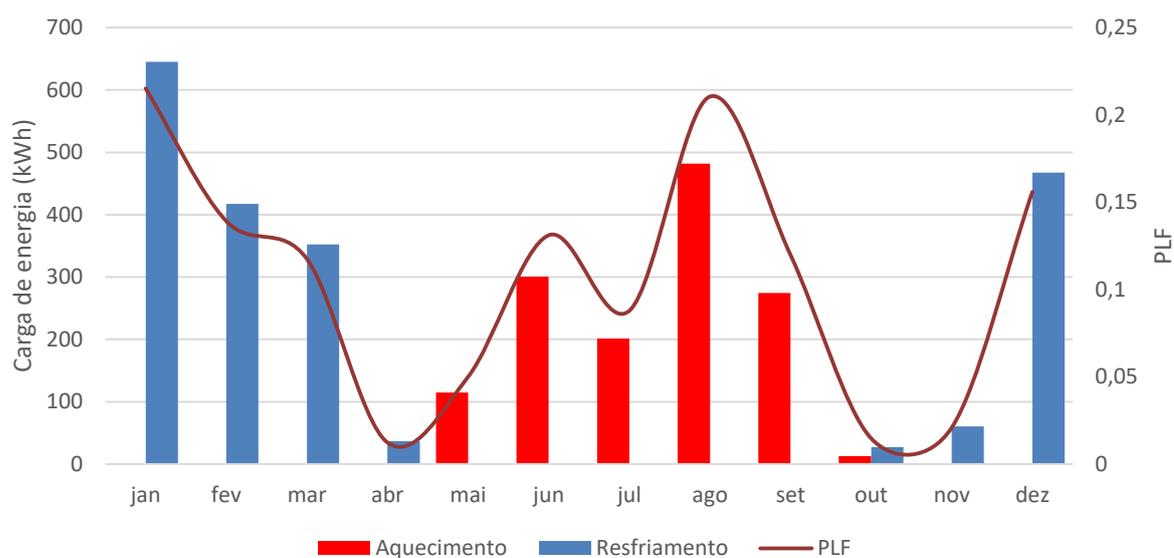


Figura 43: Cargas de energia para o conforto térmico da edificação.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

As Figuras 44 e 45 mostram a atuação do sistema de condicionamento sobre o ambiente interno do PCA (comparar com a condição não-condicionada nas Figuras 41 e 42). Elas também ilustram o uso elevado da bomba de calor, como medido pelo *PLF*.

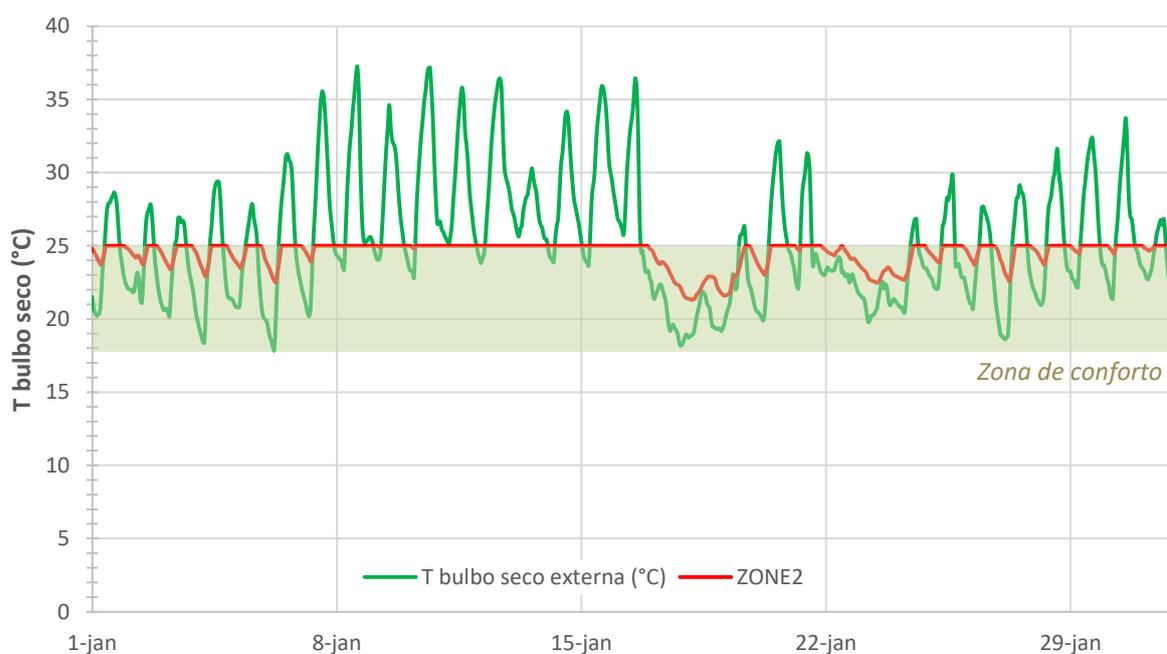


Figura 44: Temperaturas da edificação sob condicionamento térmico em janeiro.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

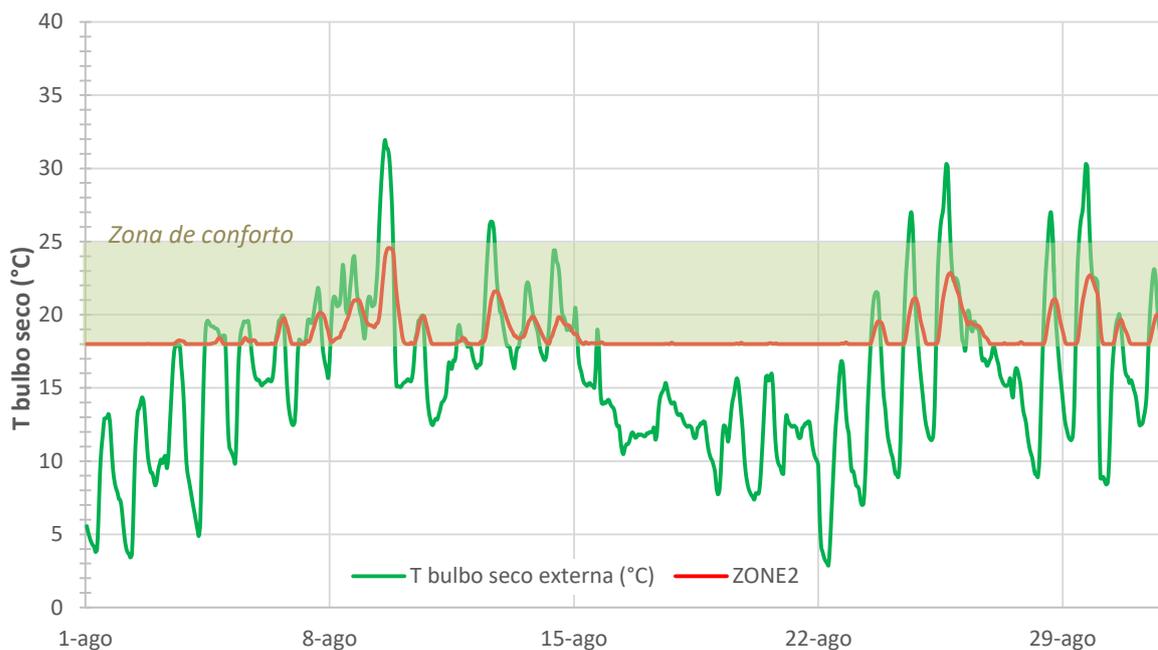


Figura 45: Temperaturas da edificação sob condicionamento térmico em agosto.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

5.6 CUSTOS

5.6.1 Custos de investimento

Para um A/C *split*, os custos de investimentos mais significativos são o custo de compra do aparelho e o custo de instalação na edificação. Para uma GCHP, além destes custos, há também o custo do circuito enterrado e das escavações para instalá-lo sob o solo.

O custo da bomba de calor varia bastante em função da capacidade especificada. Para A/Cs, foram pesquisados os preços anunciados em janeiro de 2017 para os modelos com a função “inverter” entre diversos fornecedores locais e, após definida a capacidade necessária, selecionado o menor preço. Para os GSHPs, foram pesquisados os preços entre fornecedores internacionais, e os mais econômicos vieram de vendedores nos EUA que fornecem diretamente kits geotérmicos completos, incluindo os tubos de PE, tubos de distribuição e solução de fluido de transporte (INGRAMS, 2017). Uma adaptação desta simplicidade foi incorporada a este trabalho, a fim de baixar um pouco mais os custos: apesar de a bomba de calor em si necessitar

ser importada, as demais peças podem ser compradas localmente e apenas na quantidade necessária. O circuito enterrado é composto por simples tubos plásticos (geralmente polietileno) e material de enchimento, cujo custo é baixo comparado ao da bomba de calor em si. Desta maneira, encomendando-se as partes separadamente neste caso levou a um custo total menor. Além disso, as soluções anticongelantes de polietileno glicol que vêm com os kits não são necessárias para as condições mais amenas do Rio Grande do Sul.

Entre os fabricantes de kits mencionados, a pesquisa em janeiro de 2017 encontrou valores para as GSHPs na ordem de US\$ 2.500,00 para unidades de 24.000 BTU/h até US\$ 3.500,00 para unidades de 72.000 BTU/h – o que demonstra o ganho de escala de bombas geotérmicas. Estritamente, ao se comprar um equipamento americano, os custos de importação deveriam ser levados em conta. Entretanto, considerou-se que o objetivo deste trabalho é o de comparar diferentes tecnologias, não as políticas alfandegárias brasileiras, de modo que esta taxa não foi incorporada nesta análise inicial. De qualquer maneira, se houver a intenção de que esta tecnologia seja difundida no Brasil, isto somente será possível se GCHPs começarem a ser produzidos localmente ou, ao menos, forem isentos de taxas. (Obs.: Alguns fabricantes internacionais de A/C instalados no Brasil já produzem bombas geotérmicas em outros países.)

Quanto à instalação, a pesquisa feita no fim de 2016 indicou que o custo de instalação de uma unidade doméstica de A/C estava na ordem de R\$ 250,00 a R\$ 500,00. Embora não haja uma referência nacional para GCHPs, o kit escolhido para o projeto foi especificamente planejado como uma instalação “faça você mesmo” (INGRAMS, 2017), de modo que é razoável supor que o custo de instalação estaria na mesma ordem. De fato, tanto um A/C *split* quanto o kit GHE podem ser instalados por um usuário capacitado, de modo que o custo de instalação não é significativo na comparação geral entre os dois tipos de bombas de calor.

Quanto às escavações, para o circuito horizontal, os empreiteiros consultados indicaram um valor de R\$ 900,00/d para o aluguel de uma retroescavadeira, incluindo o serviço do operador. A colocação dos tubos e a cobertura com preenchimento são simples e não requerem mão-de-obra especializada. Para o circuito vertical, porém, foi estimado um custo mínimo de R\$ 30.000,00 para a perfuração de um poço de 50 m (usado como referência por ser o mínimo típico para poços nos EUA), embora o valor exato ainda dependesse de análise do solo. Dispor os tubos e o preenchimento, neste caso, é uma operação delicada e certamente representaria uma adição considerável ao custo. Assim, mesmo antes do projeto e avaliação do sistema, se pôde concluir que, para GCHPs verticais, apenas o custo da perfuração em si já representa um sério obstáculo à sua viabilidade econômica no Brasil.

5.6.2 Custos de operação

Os principais custos de operação são a manutenção e a demanda de energia elétrica. Foi discutido na Seção 2.5.2 que uma das vantagens de GSHPs sobre ASHPs é o custo geral de manutenção mais baixo, uma vez que o equipamento é muito menos exposto ao ambiente. Por outro lado, vistorias periódicas poderiam custar mais enquanto não houver mão-de-obra capacitada o bastante para baixar os custos. Em geral, a principal consequência da falta de manutenção é perda de eficiência e capacidade, cujo efeito deveria ser maior sobre ASHPs, pela maior exposição. Optou-se neste caso por não se considerar o custo de manutenção no cálculo, o que provavelmente levou a uma viabilidade econômica mais conservativa para a GCHP.

A seção 3.5.4 discute o potencial de GSHPs em reduzir a demanda de energia de uma edificação, facilitando a sua autossuficiência energética a partir de fontes renováveis locais, como em diversos projetos de *net zero energy*. No caso deste trabalho, é avaliado apenas o cenário mais simples, onde os sistemas de condicionamento térmico são alimentados pela fornecedora pública de energia elétrica em Porto Alegre, a CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica, a fornecedora em Porto Alegre).

O custo da demanda elétrica foi calculado pelo valor em R\$/kWh cobrado pela CEEE em janeiro de 2017. Para um consumidor residencial convencional, a tarifa na época era R\$ 0,396990/kWh (CEEE, 2017). Somadas às taxas de 30% de ICMS, 0,6122% de PIS/PASEP e 2,8179% da CONFINS, o custo total, considerado neste trabalho, era de R\$ 0,596351/kWh. No caso de carências na geração de energia (que levam ao uso de usinas termoelétricas, mais caras), são acionadas bandeiras “amarela” ou “vermelha”, que aumentam o custo entre R\$ 0,015 a 0,045/kWh, mas esses cenários não foram considerados nesta avaliação inicial. Há ainda uma taxa de disponibilidade da companhia, cobrada mesmo se nenhuma energia for consumida, mas foi considerado que os demais aparelhos elétricos da casa já superam este mínimo.

5.6.3 Taxas de juros

A taxa de juros real afeta diretamente o impacto dos custos de investimento na viabilidade a longo prazo: quanto maior a taxa, mais difícil a compensação de um investimento,

uma vez que o empréstimo necessário para a compra passa a ser mais caro do que o retorno, ou pode-se tornar mais lucrativo aplicar o valor financeiramente.

A taxa de juros nominal (i_n) considerada para este trabalho foi a taxa básica Selic definida pelo COPOM (Comitê de Política Monetária) ao fim de 2016, de 13,65% ao ano (BCB, 2017); já a inflação (Π) foi a medida pelo IBGE para o ano (IPCA), de 6,29% (IBGE, 2017). Pela Equação de Fisher (FISHER, 1930), isto resulta em uma taxa de juros real (i_r) de:

$$i_r = \frac{1 + i_n}{1 + \Pi} - 1 = \frac{1 + 0,1365}{1 + 0,0629} - 1 = 0,06924 = 6,92\% \quad (5.1)$$

Em valores mensais, estas taxas correspondem respectivamente a um i_n de 1,0720%, uma Π de 0,5096% e uma i_r de 0,5595% ao mês.

6 PROJETO DOS SISTEMAS

6.1 PROJETO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA: ASHP

Como sistema de referência ao qual o CGHP pudesse ser comparado, foi escolhido um aparelho A/C *split*, montado na parede, composto por um par condensador/evaporador, baseado em modelos comerciais disponíveis para compra no Brasil. Entre os diversos modelos disponíveis, a seleção foi restrita aos que contassem com a tecnologia “*Inverter*”, com variador de frequência para controle do compressor. Embora estes aparelhos tenham um custo inicial levemente maior, sua maior eficiência pode facilmente compensar em um curto prazo (os aparelhos deste tipo encontrados apresentavam um *COP* padrão entre 3,25 e 3,45).

A especificação da capacidade do aparelho de A/C é bastante direta e pode ser feita diretamente a partir das demandas máximas de aquecimento e resfriamento determinado pelo módulo “*Conditioned by Ideal Loads*”. Todas as bombas de calor são categorizadas pela sua capacidade em BTU/h e, normalmente, são vendidas em valores padronizados. Aparelhos domésticos costumam ter capacidades nominais de resfriamento de 9.000, 12.000, 18.000 e 22.000 BTU/h. Uma vez que a capacidade requerida pela simulação foi de 13.830 BTU/h (a demanda máxima de resfriamento), modelos de 18.000 são os menores apropriados. Os modelos nacionais encontrados nesta capacidade e dotados de tecnologia *Inverter* possuíam *COP* ao redor de 3,30, de modo que este foi o valor usado para as simulações seguintes.

É possível que, na prática, para uma distribuição melhor do condicionamento, a opção seria por dois ou mais *splits* de 9.000 BTU em diferentes cômodos em vez de um único de 18.000 (o que certamente levaria a um custo de investimento maior). Entretanto, aqui será assumido uma distribuição centralizada de ar condicionado, que é a usual quando se lida com unidades de grande capacidade como em sistemas de GCHP ou ASHP maiores.

Como comentado anteriormente, a modelagem de um sistema completo de HVAC no EnergyPlus pode ser um processo exaustivo, mas para A/Cs, felizmente há um *template* específico para equipamentos do tipo: HVACTemplate:Zone:PThp (Packaged Terminal Heat Pump). Informando-se um conjunto mínimo de variáveis, este objeto autodimensiona os demais elementos e permite ajustes posteriores pelo usuário. Catálogos e manuais de fabricantes

brasileiros de A/Cs não costumam fornecer muitos detalhes além do *EER* (ou *COP*), de modo que alguns valores padrão do EnergyPlus foram usados (Tabela 20).

Tabela 20: Modelagem do PTHP no EnergyPlus.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Campo		Valor
Cooling	Setpoint	25 °C
	Schedule and availability	always on
	Supply air flow rate	autosize
	Cooling coil type	SingleSpeedDX
	Cooling coil gross rated total capacity	autosize
	Cooling coil gross rated sensible heat ratio	autosize
	Cooling coil gross rated COP	(by manufacturer)
	Supply air temperature	14 °C
Heating	Setpoint	18 °C
	Schedule and availability	always on
	Supply air flow rate	autosize
	Heat pump heating coil type	SingleSpeedDXHeatPump
	Heat pump heating coil gross rated capacity	autosize
	Heat pump heating coil gross rated COP	(by manufacturer)
	Heat pump heating minimum outdoor drybulb temperature	-8 °C
	Supply air temperature	50 °C
	Supplemental heating coil type	none
Defrost	Defrost maximum outdoor drybulb temperature	5
	Defrost strategy	ReverseCycle
	Defrost control	Timed
	Defrost time period fraction	0.058333
Outdoor air	Flow rate	0
	Dedicated outdoor air system	none
Baseboard	Heating type	none

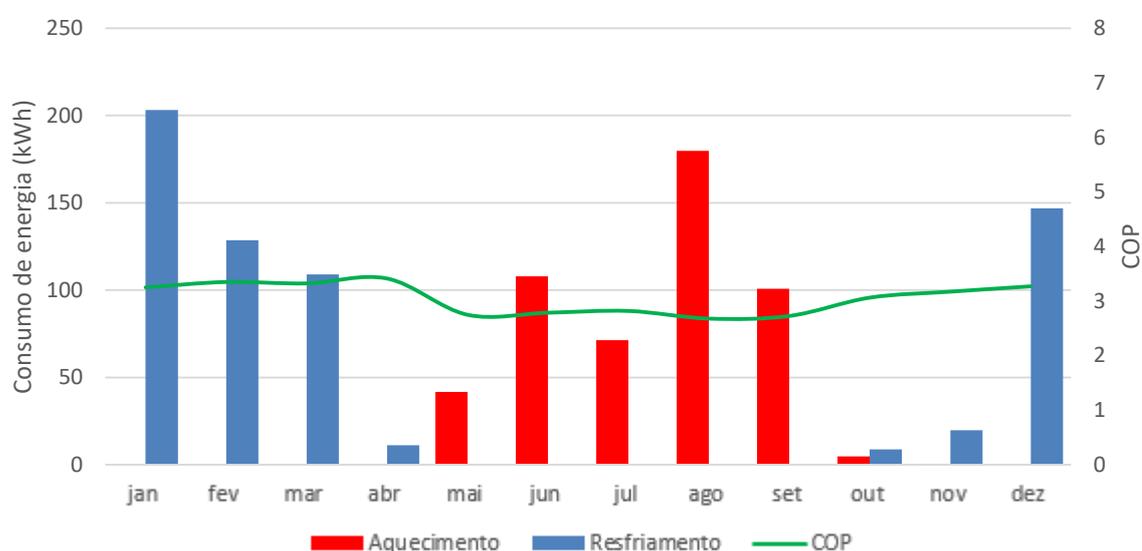
Um objeto de PTHP deve ser especificado para cada zona, o que resulta em dimensionamentos diferentes para cada um. De modo a se projetar um único aparelho de A/C para as necessidades da casa, foram usadas as somas das capacidades brutas e demandas de energia para cada aparelho de cálculo. Por este processo, a simulação rodada no EnergyPlus resultou no consumo anual de energia apresentado na Tabela 21 e na Figura 46.

Tabela 21: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – ASHP.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Consumo de energia elétrica (kWh)													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Aquecimento	-	-	-	0,0	41,7	107,9	71,4	179,8	100,7	4,7	0,6	-	506,8
Resfriamento	203,1	128,6	108,9	11,1	-	-	-	0,1	0,0	8,7	19,7	146,9	627,2
COP efetivo	3,25	3,35	3,32	3,41	2,75	2,79	2,82	2,68	2,73	3,06	3,17	3,27	3,07

Consumo de energia anual total: 1,134 kWh

**Figura 46:** Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – ASHP.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Comparando a Figura 46 com a Figura 43, percebe-se que o consumo de energia elétrica é muito menor do que a carga térmica exigida pela edificação (o que é o princípio básico de uma bomba de calor). Pode-se ver também que, apesar do *COP* padrão de 3,30, o *COP* efetivamente apresentado ao longo do ano variou, sendo levemente menor a maioria do tempo.

6.2 PROJETO DOS SISTEMAS DE GSHPs

Em toda a busca por bombas de calor geotérmicas apropriadas nos sites de companhias vendedoras internacionais, a menor capacidade encontrada foi de 1,5 ton (18.000 BTU/h, a mesma capacidade definida no projeto para o A/C). Porém, esta é uma especificação relativamente rara e difícil de ser encontrada nos catálogos dos fabricantes. Bombas de calor de 2 ton são uma capacidade muito mais comum e alguns modelos encontrados na época desta pesquisa eram mesmo mais baratos dos que os poucos de 1,5 ton. Desta maneira, um desses, da GeoCool (GCHP01024), foi o selecionado. Definida a bomba de calor em si, o circuito enterrado foi calculado para uma configuração vertical e uma horizontal pelas diferentes abordagens explicadas nas Seções 4.2.2 e 4.2.3.

6.2.1 Projeto simplificado de GCHPs de acordo com as recomendações da ASHRAE

Como uma primeira estimativa, um GCHP vertical e um horizontal foram projetados seguindo as recomendações simplificadas da ASHRAE explicadas na Seção 4.2.3 (Tabelas 10, 11 e 12). Como indicado, estas tabelas foram elaboradas baseadas na observação empírica de instalações nos Estados Unidos, as quais diferem do caso de referência por uma temperatura do solo mais baixa e pelo uso de aquecimento elétrico suplementar. Não apenas isso, aquelas tabelas não fornecem valores de eficiência para as bombas de calor, de modo que não há uma maneira precisa de se determinar o consumo de energia. Ainda assim, elas servem para indicar um arranjo e como referência inicial para os circuitos enterrados – o que foi valioso na falta de exemplos locais para comparação.

Durante o pico da condição de resfriamento, em janeiro, a temperatura do solo (T_g) em Porto Alegre é de 21,26 °C para uma profundidade de 2 m e de 20 °C para profundidades muito maiores. Pela Tabela 11, isto leva a 35 m de trincheira/kW para um circuito horizontal de dois tubos e de 19 m de poço/kW para um circuito vertical de tubos em U de 25 mm. Como foi assumido que k_g é de 2,5 W/m.K para 2 m de profundidade e 3,1 W/m.K para muito mais (Seção 5.2), os valores anteriores devem ser corrigidos pela Tabela 12: por um fator de 0,81

para o circuito horizontal e de 0,83 para o vertical. Ainda, para o preenchimento do poço, utilizando-se misturas ricas em sílica (areia), um outro fator de 0,95 deve ser aplicado.

Aplicando-se todos os fatores, pode-se obter uma estimativa inicial para os comprimentos de escavação para cada caso:

Tabela 22: Comprimentos de escavação pelas recomendações simplificadas da ASHRAE.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Comprimento da trincheira ou poço			
GCHP vertical (Tubo em U 25 mm)	Aquecimento	$L_h = 3,11 \text{ kW} \times 19 \times 0,83 \times 0,95 = 46,6 \text{ m}$	L = 60,8 m de poço
	Resfriamento	$L_c = 4,05 \text{ kW} \times 19 \times 0,83 \times 0,95 = 60,8 \text{ m}$	
GCHP horizontal (2 tubos)	Aquecimento	$L_h = 3,11 \text{ kW} \times 35 \times 0,81 \times 0,95 = 83,8 \text{ m}$	L = 109,1 m de trincheira
	Resfriamento	$L_c = 4,05 \text{ kW} \times 35 \times 0,81 \times 0,95 = 109,1 \text{ m}$	

6.2.2 Projeto de um GCHP vertical

Este projeto seguiu o modelo da ASHRAE/Kavanaugh (seção 4.2.2), que consiste em determinar o comprimento apropriado para os casos de aquecimento e resfriamento, de acordo com as características do solo, cargas térmicas e especificações da bomba de calor. Enquanto muitas destas variáveis são determinadas pelo ambiente e pelas demandas da edificação, a temperatura do fluido retornando à bomba de calor (T_{wi}) é definida pelo projetista e é o principal ponto de otimização do projeto (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014).

Mantendo esta temperatura (ELT , como é mais conhecida) próxima à temperatura do solo, T_g , obtém-se uma operação mais eficiente da bomba, embora se requeira um circuito enterrado mais longo e mais caro para esta operação ser atingida. Esta definição é, assim, um compromisso entre uma demanda de potência menor ou uma instalação menor, o que no fim significa um compromisso entre custos de operação e custos de investimento. Desta maneira, o projeto de um sistema de GCHP se prova mais complexo do que o de uma ASHP, porque agora não é apenas a melhor bomba de calor que deve ser especificada, mas a melhor combinação entre uma bomba de calor e o circuito enterrado.

De acordo com Kavanaugh e Rafferty (2014), o balanço ótimo tipicamente ocorre quando a temperatura de projeto no modo de resfriamento, ELT_c , é definida entre 11 °C a 17°

C acima de T_g e, quando no modo de aquecimento, ELT_h é entre 5 °C e 8 °C menor do que T_g . Enquanto esta é a experiência para a maioria dos Estados Unidos, os autores reconhecem que os ELT_c e ELT_h ótimos tendem a estar no limite inferior dessas faixas para climas mais quentes, como o caso de Porto Alegre.

Além das temperaturas de operação, a vazão do líquido circulando no circuito enterrado também é necessária para calcular o comprimento dos tubos. Mais uma vez, de acordo com Kavanaugh e Rafferty (2014), a vazão ótima para circuitos fechados está tipicamente na faixa entre 2,7 a 3,2 L/(min·kW). Enfim, o comprimento final especificado para o circuito será o maior entre os dimensionados para resfriamento e aquecimento. Se o comprimento para resfriamento for o maior, ELT_h pode ser aumentada até que o valor resultante para L_h seja similar ao de L_c , o que resultará em uma eficiência (COP_h) maior nesta operação. O mesmo princípio se aplica se o comprimento para aquecimento for o maior.

Desta maneira, o processo de dimensionamento de um sistema de GCHP é iterativo e requer que o impacto de cada parte no custo final seja conhecido desde o começo para uma solução otimizada. Para este trabalho, os passos foram:

1. Especificar a bomba de calor. Para bombas de pequena capacidade, o custo de investimento tem um impacto muito maior do que pequenas variações de eficiência, de modo que a bomba mais econômica que atenda ao serviço foi a selecionada. Uma vez que ainda não há fabricantes brasileiros de bombas geotérmicas, foram procurados modelos comerciais entre fornecedores americanos e europeus.
2. Selecionar as temperaturas de entrada ELT_c e ELT_h preliminares e a vazão de operação, V_{H2O} . Usar estas para corrigir a capacidade total, o EER , o COP e a potência da bomba de acordo com a folha de dados do modelo.
3. Calcular as temperaturas de saída LLT_c e LLT_h (Equações 4.22 e 4.23).
4. Calcular os comprimentos de tubo L_c e L_h (Equações 4.17 e 4.18).
5. Retornar ao passo 2 e otimizar o maior dos dois comprimentos pelo impacto no custo de operação e demanda de energia.
6. Aproximar o menor comprimento ao maior, de modo a aumentar o COP para a operação.

Esses passos foram parcialmente automatizados em planilhas do Excel, a fim de facilitar o esforço de cálculo. Para a correção dos valores da bomba no passo 2, foi usado o

WAHPCorrector14.xlsm que acompanha o “Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems” (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014).

Consultas com empreiteiros em Porto Alegre alertaram que o custo de perfurações verticais na área poderia facilmente disparar após somente algumas dúzias de metros em função do substrato rochoso – e provavelmente também pela falta de equipamento especializado. Assim, para o projeto de um sistema GCHP vertical, limitar a profundidade do poço foi uma prioridade.

Sabia-se que a demanda de resfriamento seria o fator limitante, de modo que L_c foi o primeiro a ser calculado. V_{H2O} foi definida perto do valor máximo recomendado, de 3,1 L/(min.kW), a fim de aumentar a troca de calor e otimizar os demais parâmetros. Sendo $T_g = 20$ °C, o projeto iterativo apontou uma $ELT_c (T_{wi,c})$ de 30 °C como um bom compromisso entre a eficiência da bomba de calor e o comprimento do circuito. Estabelecida esta temperatura, as demais variáveis foram automaticamente definidas e L_c foi determinada. Após este passo, $ELT_h (T_{wi,h})$ foi definida de modo a que L_h resultasse próximo a L_c (Tabela 23). O comprimento final para o circuito enterrado, 66,8 m, foi na mesma ordem do projeto simplificado da Seção 6.2.1, mas levemente maior, provavelmente porque a diferença de temperatura média entre o ar e o solo seja menor em Porto Alegre do que na maioria dos casos americanos.

Tabela 23: Parâmetros para o projeto de um sistema GCHP vertical.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Parâmetros da edificação					
q_a	-0,071 kW	q_c	-3,847 kW	q_h	2,962 kW
		$PFL_{m,c}$	0,215	$PFL_{m,h}$	0,210
Parâmetros do solo					
k_g	3,1 W/m.K	k_{grout}	2,2 W/m.K	α	0,08 m ² /d
R_{ga} (Eq. 4.20)	121,083 m.K/kW	F_{O_f} (Eq. 4.21)	1884288	G_f (Fig. 24)	1,20698
R_{gm} (Eq. 4.20)	120,945 m.K/kW	F_{O_1} (Eq. 4.21)	15488	G_1 (Fig. 24)	0,831624
R_{gst} (Eq. 4.20)	147,321 m.K/kW	F_{O_2} (Eq. 4.21)	128	G_2 (Fig. 24)	0,456694
R_b (BoreResistSI)	0,115 m.K/kW			F_{sc} (Tabela 9)	1,06
T_g	20 °C			T_p	-

Parâmetros da bomba			
V_{H2O}	1362,748 L/h		$c_{p,H2O}$ 4,187 J/kg.K
$T_{wi,c}$	30 °C		$T_{wo,c}$ (Eq. 4.22) 35,57 °C
W_c (F. dados)	0,790 kW	P_c (F. dados) 7,324 kW	COP_c (F. dados) 4,870
$T_{wi,h}$	15 °C		$T_{wo,h}$ (Eq. 4.23) 11,41 °C
W_h (F. dados)	0,601 kW	P_h (F. dados) 7,136 kW	COP_h (F. dados) 4,925
Dimensionamento do poço			
L_c (Eq. 4.17)	66,79 m	L_h (Eq. 4.18)	61,88 m
$L = 66,8$ m de profundidade			

Para a estimativa do consumo de energia elétrica ao longo do ano, foi escolhida uma abordagem diferente da usada para a ASHP. Como explicado na seção 4.3, diferentemente de A/Cs, o EnergyPlus não possui um *template* para um sistema de HVAC com GSHP, o que torna a modelagem mais difícil. Embora após um grande esforço de modelagem se pudesse usar um dos modelos de GSHP para a bomba em si, estes aceitam apenas a entrada do COP padrão, enquanto que a folha de dados do fabricante fornece valores medidos de COP para diferentes condições de operação. Esta é uma informação valiosa para uma confiabilidade ainda maior dos resultados.

A solução adotada, então, foi calcular as funções que relacionam a eficiência (COP), a T_{wi} e a demanda de energia. Após o comprimento do circuito enterrado e a vazão de circulação estarem definidos, para cada carga de energia q resulta uma T_{wi} , que pode ser calculada pelo mesmo método de correção do passo 2 (*WAHPCorrector14.xlsm*). Já que $COP = f(T_{wi})$ e $T_{wi} = f(q)$, então por regressão linear, foi possível montar curvas de $COP_c = f(q_c)$ e $COP_h = f(q_h)$ a partir dos valores na folha de dados. Estas funções foram aplicadas diretamente em cada carga horária de energia ao longo do ano (obtidas pela simulação energética da edificação) para se obter os consumos horários e anuais de energia elétrica. Este cálculo também foi inserido em uma planilha de Excel e funcionou bem durante todo o processo de iteração.

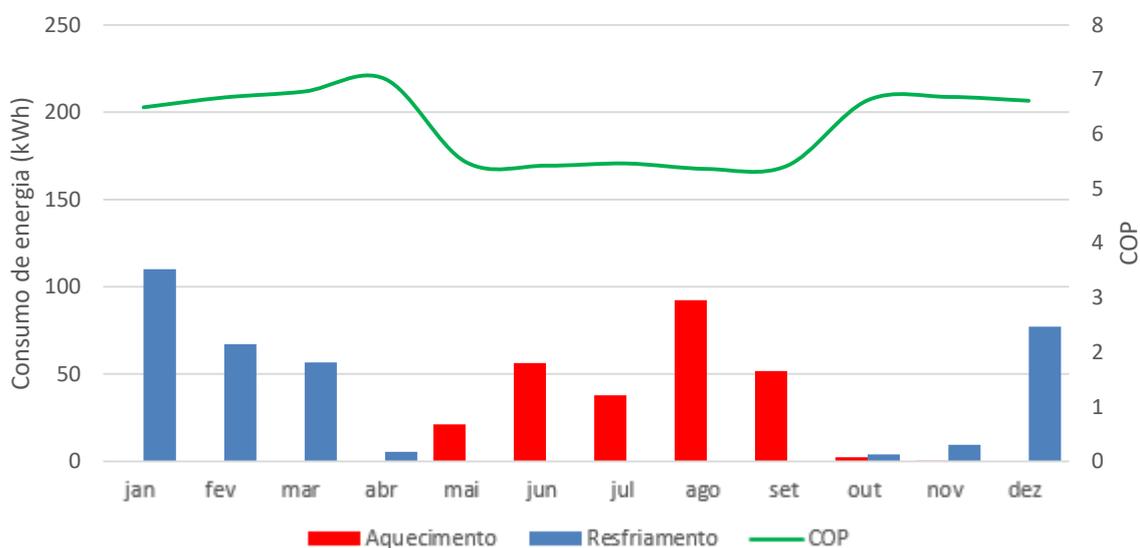
Como visto na Tabela 24, o COP efetivo anual foi 111% maior para a GCHP vertical, comparada à ASHP, o que levou a um consumo de energia elétrica 48% menor.

Tabela 24: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP vertical.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Consumo de energia elétrica (kWh)													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Aquecimento	-	-	-	0,0	21,1	56,3	37,9	92,3	51,8	2,4	0,3	-	262,1
Resfriamento	110,1	67,0	56,7	5,5	-	-	-	0,0	0,0	4,0	9,4	77,1	329,8
COP efetivo	6,49	6,67	6,78	7,01	5,49	5,42	5,46	5,36	5,42	6,62	6,68	6,61	6,48

Consumo de energia anual total: 592 kWh

**Figura 47:** Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP vertical.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

6.2.3 Projeto de um GCHP horizontal

A principal diferença entre o projeto e estimativa de demanda de energia de um sistema de GCHP horizontal comparado ao de um vertical é a temperatura do solo, T_g , que em profundidades mais rasas não pode ser assumida como constante ao longo do ano. Assim, a T_g usada para calcular L_c e L_h é a correspondente a cada mês quando ocorrem as demandas máximas de resfriamento e aquecimento (respectivamente janeiro e agosto).

Para a estimativa do consumo de energia elétrica, a complexidade também é maior, porque agora $COP_c = f(q_c, T_{g,month})$ e $COP_h = f(q_h, T_{g,month})$. Em vez de se criar um par de

funções a duas variáveis, optou-se por criar um par de funções a uma variável para cada mês, assumindo T_g constante para aquele mês. Este processo também foi semiautomatizado no Excel.

Por último, o impacto das escavações também é diferente para GCHPs horizontais, uma vez que elas não se valem de perfurações, mas de trincheiras, cujo custo é muito menor. Estas podem ser valas profundas e estreitas (escavadas com uma máquina de valas) ou trincheiras largas (escavadas com uma retroescavadeira), com os tubos separados por 30 a 60 cm (KAVANAUGH; RAFFERTY, 2014). Uma escavadeira é muito mais fácil de ser encontrada no Rio Grande do Sul e foi a opção preferida. Este tipo de equipamento é alugado por dia e, como confirmado com os empreiteiros, um único dia é suficiente para uma trincheira bastante longa ou mesmo várias trincheiras. Assim, com menos restrições de custos e bastante área disponível, o circuito enterrado horizontal pôde ser estendido para o dobro do comprimento do vertical, maximizando a eficiência da bomba – notado especialmente pelo COP_c obtido de 5,49.

Tabela 25: Parâmetros para o projeto de um sistema GCHP horizontal.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Parâmetros da edificação					
q_a	-0,071 kW	q_c	-3,847 kW	q_h	2,962 kW
		$PFL_{m,c}$	0,215	$PFL_{m,h}$	0,210
Parâmetros do solo					
k_g	2,5 W/m.K	k_{grout}	2,2 W/m.K	α	0,08 m ² /d
R_{ga} (Eq. 4.20)	150,142 m.K/kW	F_{of} (Eq. 4.21)	1884288	G_f (Fig. 24)	1,20698
R_{gm} (Eq. 4.20)	149,972 m.K/kW	F_{o1} (Eq. 4.21)	15488	G_1 (Fig. 24)	0,831624
R_{gst} (Eq. 4.20)	182,678 m.K/kW	F_{o2} (Eq. 4.21)	128	G_2 (Fig. 24)	0,456694
R_b (BoreResistSI)	0,115 m.K/kW			F_{sc} (Tabela 9)	1,06
$T_{g,c}$	21,26 °C	$T_{g,h}$	17,49 °C	T_p	-
Parâmetros da bomba					
V_{H2O}	1362,748 L/h			$c_{p,H2O}$	4,187 J/kg.K
$T_{wi,c}$	26,26 °C			$T_{wo,c}$ (Eq. 4.22)	31,87 °C
W_c (F. dados)	0,700 kW	P_c (F. dados)	7,518 kW	COP_c (F. dados)	5,494
$T_{wi,h}$	15 °C			$T_{wo,h}$ (Eq. 4.23)	11,64 °C
W_h (F. dados)	0,598 kW	P_h (F. dados)	6,671 kW	COP_h (F. dados)	4,950
Dimensionamento da trincheira (2 tubos)					
L_c (Eq. 4.17)	133,08 m	L_h (Eq. 4.18)	125,18 m		
$L = 133,1$ m de trincheira					

Embora as eficiências máximas obtidas pelo GCHP horizontal estendido tenham sido maiores do que as do GCHP vertical (mais uma vez, porque os custos restringiram menos o comprimento de projeto para o horizontal), o efeito sobre o consumo anual de energia foi muito mais sutil. Comparando mês a mês o desempenho de ambos, a Tabela 26 e a Figura 48 mostram que o circuito horizontal se comporta melhor no início de cada ciclo de aquecimento/resfriamento, mas pior no fim. Este efeito é provavelmente devido ao atraso de temperaturas do solo, que fornece uma vantagem a curto prazo. Por exemplo, um solo raso mais aquecido pelo verão do que um profundo é uma vantagem no início do inverno, mas após alguns meses, sua temperatura se aproxima mais à do ar e a eficiência diminui.

Tabela 26: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP horizontal.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Consumo de energia elétrica (kWh)													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Aquecimento	-	-	-	0,0	20,2	54,9	37,9	93,9	53,7	2,5	0,3	-	263,4
Resfriamento	104,6	68,6	59,1	5,9	-	-	-	0,0	0,0	3,5	8,4	70,1	320,3
COP efetivo	6,54	6,36	6,30	6,44	5,72	5,53	5,39	5,21	5,18	6,96	7,11	6,99	6,40

Consumo de energia anual total: 584 kWh

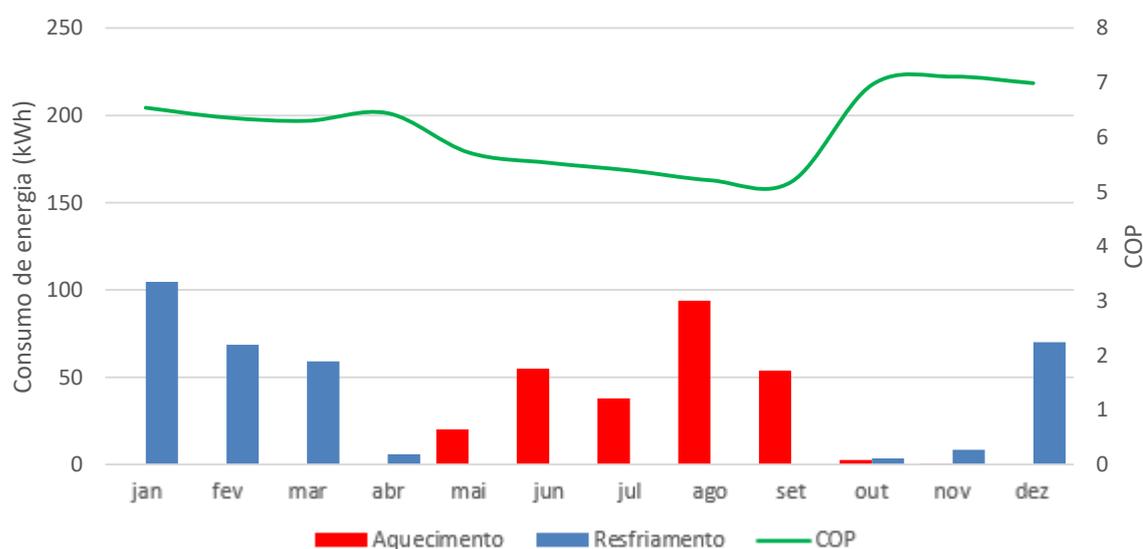


Figura 48: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – GCHP horizontal.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Embora circuitos um par linear de tubos seja o arranjo mais eficiente (em kW de calor trocado pelo solo por m de tubo) para um circuito horizontal, os arranjos mais comuns na prática são as de múltiplas camadas ou em espirais *slinky*, devido à considerável redução na área de terreno necessária (ASHRAE, 2011; KENSA, 2018). Em terrenos limitados, inclusive, somente por estes arranjos, circuitos horizontais podem ser tecnicamente viáveis. Contudo, como o esforço poupado em escavação é compensado pelo cuidado maior na disposição dos tubos, estes diferentes arranjos não levam necessariamente a uma redução do tempo de execução e dos custos (ASHRAE, 2011).

Ao se juntar mais de um par de tubos, o curto-circuito de calor entre eles reduz sua eficiência e exige um comprimento total maior. A intensidade deste efeito, porém, é mais difícil de ser calculada em uma trincheira horizontal do que um poço vertical, uma vez que em baixas profundidades, os efeitos de convecção e evaporação de água são maiores. O projeto nestes casos ainda se baseia muito na experiência dos executores com cada condição e em estimativas como as da ASHRAE (2011), na Tabela 11. Valendo-se daquela tabela como referência, foram estimados novos comprimentos para a trincheira que pode ser obtido.

Tabela 27: Comprimentos de trincheira para o GCHP horizontal.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Tipo de serpentina	Passo (m de tubo por m trincheira/poço)	Comprimento da trincheira		Comprimento total de tubos (m)
		Referência ^(a)	L (m)	
2 tubos	2	100%	133,1	266,2
4 tubos/Espiral 4 passos	4	65%	86,3	345,1
6 tubos/Espiral 6 passos	6	58%	77,8	466,8
Espiral 10 passos	10	44%	58,3	582,8

(a) Baseado nas estimativas de KAVANAUGH; CALVERT (1995), mostradas na Tabela 11.

A Figura 49 representa o layout básico para a instalação dos diferentes tipos de GCHPs dimensionados para o Protótipo Alvorada.

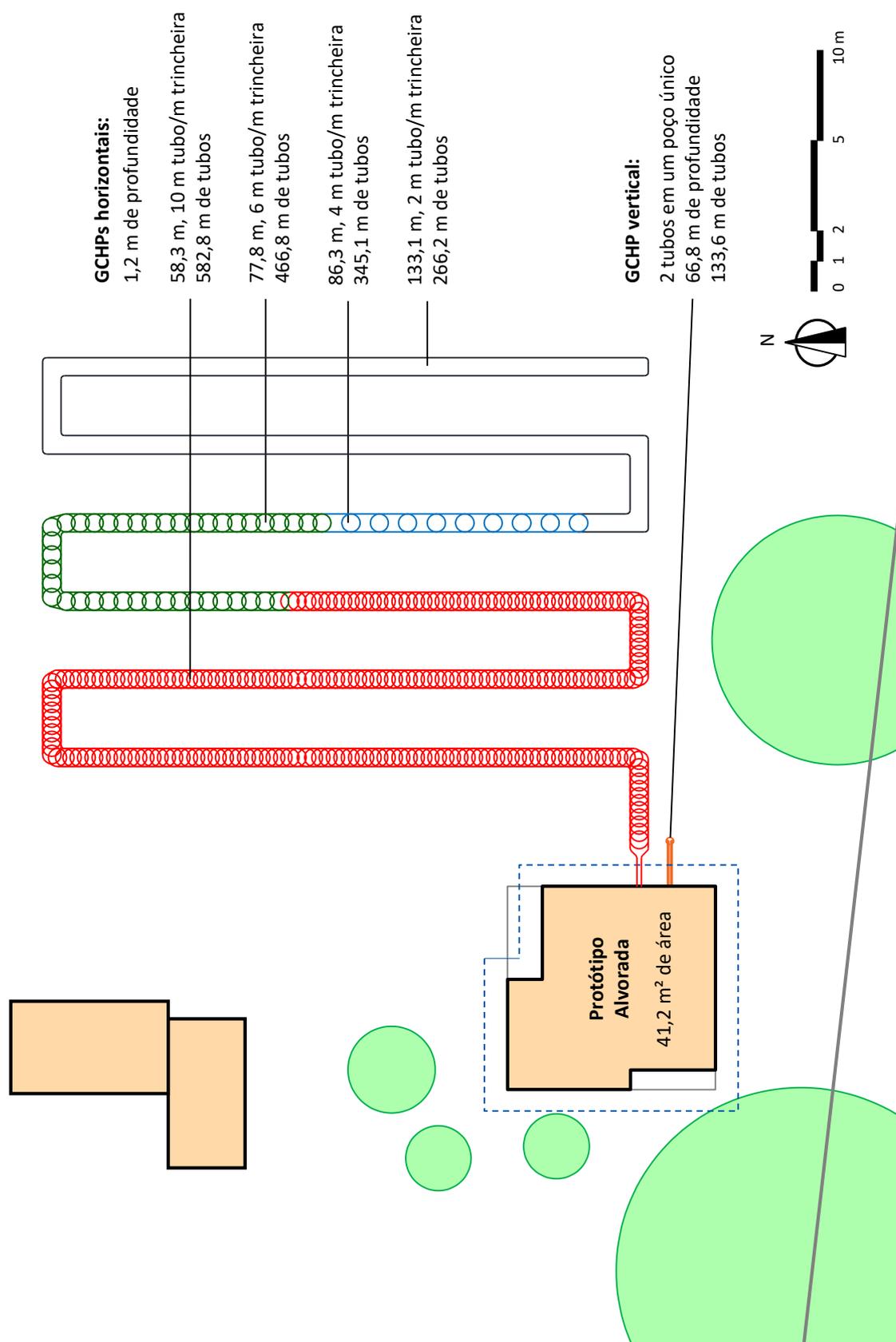


Figura 49: Layout conceitual para diferentes GCHPs no PCA.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

7 ESTUDO DE VIABILIDADE

7.1 ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA

A análise da viabilidade técnica foi feita concomitante com o projeto conceitual e baseou-se na verificação do aumento na eficiência durante a operação e a redução no consumo de energia comparados com o sistema de referência, a ASHP. Era esperado desde o começo desta pesquisa que uma GCHP deveria apresentar um desempenho ao menos minimamente superior ao de um A/C, uma vez que esta é uma característica intrínseca do sistema. Porém, não se sabia a medida desta diferença, o que é crucial para julgar se esta tecnologia seria merecedora de investimentos.

Como indicaram as simulações, os resultados confirmaram que o clima do Rio Grande do Sul oferece condições para um desempenho muito maior de GSHPs sobre ASHPs. Em ambos os projetos de GCHP, os sistemas atingiram aproximadamente o dobro da eficiência do aparelho de A/C convencional mais eficiente disponível comercialmente. Isto significa metade do consumo de energia elétrica para o condicionamento térmico, o que favorece tanto a redução do impacto ambiental de edificações existentes, como o condicionamento de mais edificações sem um aumento proporcional do consumo.

É importante ressaltar que o ganho comparado aos sistemas de condicionamento térmico efetivamente mais usados em residências no Rio Grande do Sul seria ainda maior. Primeiramente, porque o modelo de A/C selecionado para a simulação é de alta eficiência, bem maior do que o *COP* mínimo de 2,6 exigido atualmente para os fabricantes (SHORES, 2017). Em segundo, porque o aquecimento elétrico mais comum ainda é via resistência elétrica (inclusive em A/Cs), o qual atinge um *COP* máximo de 1,0, ou seja, consumindo três vezes mais energia para o mesmo serviço. Para o Protótipo Alvorada, por exemplo, atender à demanda de conforto especificada com estas eficiências mínimas levaria a um consumo de cerca de 2.160 kWh/ano (772 kWh para resfriamento e 1.388 kWh para aquecimento). Os GCHPs projetados, assim, representariam uma redução de quase 73% no consumo de energia elétrica frente a esta situação mais típica.

A Figura 50 compara o consumo de energia mensal de todos os tipos de bomba de calor estudados, enquanto a Tabela 28 sumariza os valores anuais e especificações. Considerando como GCHPs horizontais e verticais se comportaram de modo similar em condições locais, a preferência pelo tipo vertical, muito mais caro, provavelmente se justificaria apenas onde houver uma grande limitação de espaço.

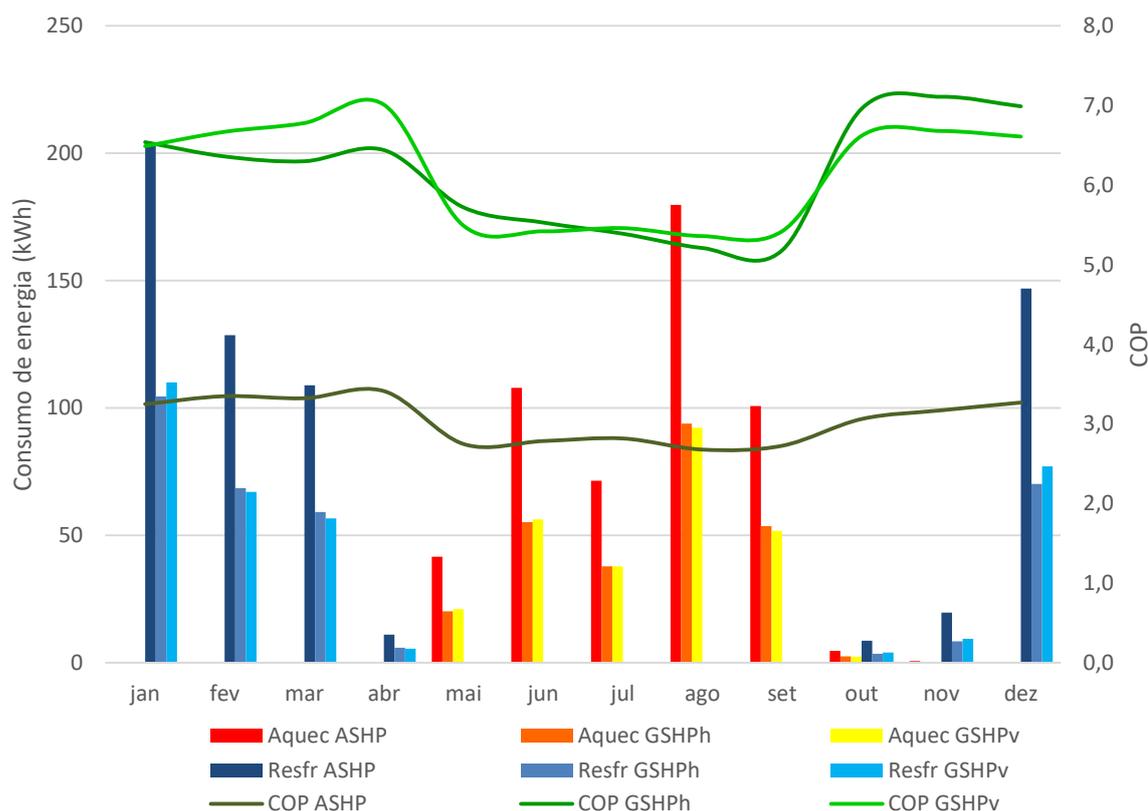


Figura 50: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – diferentes HPs.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Tabela 28: Consumo de energia de um HVAC para conforto térmico – diferentes HPs.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

	Consumo anual de energia (kWh)			Eficiência (COP)	Tamanho do circuito enterrado (m)
	Aquecimento	Resfriamento	Total		
ASHP alta eficiência	506,8	627,2	1134,0 (ref.)	3,07 (ref.)	-
GCHP horizontal	263,4	320,3	583,7 (-48,5%)	6,40 (+108%)	133,1 de comprimento
GCHP vertical	262,1	329,8	591,9 (-47,8%)	6,48 (+111%)	66,8 de profundidade

7.2 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O estudo de viabilidade econômica deste trabalho se focou em avaliar se os custos de operação menores de uma GSHP, comparados aos de uma ASHP, poderiam compensar seu custo de investimento mais elevado para o caso de referência, o PCA. Após, com os dados obtidos, foi investigado o impacto de diferentes parâmetros de modo que a avaliação pudesse ser extrapolada para outros casos no Rio Grande do Sul e em diferentes cenários econômicos.

Um método comum para avaliação de viabilidade econômica é o da análise diferencial de VPL (valor presente líquido) ou VFL (valor futuro líquido) de cada alternativa. O método a seguir é uma reformulação do método de diferença de VFLs, explicitando a redução nos gastos.

Assumindo:

$$\begin{aligned}
 Inv_{AC} &= \text{custo de investimento total de um sistema A/C, R\$} \\
 Inv_{GCHP} &= \text{custo de investimento total de um sistema GCHP, R\$} \\
 \Delta Inv &= Inv_{AC} - Inv_{GCHP} = \text{diferença entre os custos de investimento, R\$} \\
 Op_{AC} &= \text{custo operacional mensal de um sistema A/C, R\$} \\
 Op_{GCHP} &= \text{custo operacional mensal de um sistema GCHP, R\$} \\
 \Delta Op &= Op_{AC} - Op_{GCHP} = \text{diferença entre os custos mensais de operação, R\$} \\
 i_r &= \text{taxa de juros real mensal, razão}
 \end{aligned}$$

O *Ganho* acumulado a cada mês n é a soma das diferenças dos custos de investimento e operação reajustados pela taxa de juros real mensal. Assim:

$$\begin{aligned}
 \text{Inicial:} & \quad Ganho_0 = \Delta Inv \\
 1^\circ \text{ mês:} & \quad Ganho_1 = \Delta Inv(1 + i_r) + \Delta Op \\
 2^\circ \text{ mês:} & \quad Ganho_2 = [\Delta Inv(1 + i_r) + \Delta Op](1 + i_r) + \Delta Op \\
 & \quad \quad \quad = \Delta Inv(1 + i_r)^2 + \Delta Op[(1 + i_r) + 1] \\
 3^\circ \text{ mês:} & \quad Ganho_3 = \Delta Inv(1 + i_r)^3 + \Delta Op[(1 + i_r)^2 + (1 + i_r) + 1]
 \end{aligned}$$

E após n meses:

$$Ganho_n = \Delta Inv(1 + i_r)^n + \Delta Op \sum_{i=0}^{n-1} (1 + i_r)^i \quad (7.1)$$

Para um investimento em uma GCHP ser economicamente viável, os ganhos devem crescer com o tempo, de modo que, eventualmente, elas se tornem positivos. Isto significa que $Ganho_1 > Ganho_0$, o que implica em $\Delta Inv(1 + i_r) + \Delta Op > \Delta Inv$ e, por conseguinte, em $-\Delta Op/\Delta Inv > i_r$. Ou, em outros termos:

$$\frac{Op_{AC} - Op_{GCHP}}{Inv_{GCHP} - Inv_{AC}} > i_r \quad (7.2)$$

Esta relação simples estabelece se um investimento em GCHP é economicamente viável (em um tempo infinito). Na prática, importa saber se o investimento compensará em um curto ou médio prazo, como em 2 ou 10 anos. Esta condição é satisfeita se, pela Equação 7.1:

$$Ganho_n > 0, \quad n = \text{anos} \times 12 \quad (7.3)$$

Recapitulando, o caso de estudo foi estabelecido como o projeto necessário para oferecer conforto térmico ao Protótipo Alvorada, definido como uma faixa de temperatura constantemente entre 18 e 25 °C, no clima de Porto Alegre, com uma ocupação padrão pelo RTQ-R e os preços e índices econômicos até o início de 2017. Considerando os sistemas projetados, os seguintes parâmetros econômicos foram obtidos:

Tabela 29: Variáveis para avaliação econômica do estudo de caso – 2017.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Custos de investimento						
	A/C split 18.000 BTU/h		2,0 ton GCHP vertical		2,0 ton GCHP horizontal	
Pacote bomba de calor	R\$ 2.795,00		R\$ 11.022,01 ^(a)		R\$ 11.248,76 ^(a)	
Instalação ^(d)	R\$ 375,00		R\$ 375,00		R\$ 375,00	
Escavações	-		R\$ 30.000,00 ^(e)		R\$ 900,00	
Total	R\$ 3.170,00		R\$ 41.397,01		R\$ 12.523,76	
Custos operacionais						
Eletricidade ^(b)	Tarifa 0,396990 R\$/kWh		Taxas ICMS(30%) + PIS/PASEP(0,6122%) + COFINS(2,8179%)			
	Total 0,596351 R\$/kWh					
Contas de energia mensais						
	A/C split		GCHP vertical		GCHP horizontal	
	kWh	R\$	kWh	R\$	kWh	R\$
Janeiro	203,10	121,12	110,09	65,65	104,59	62,37
Fevereiro	128,62	76,70	67,01	39,96	68,56	40,89
Março	108,88	64,93	56,68	33,80	59,15	35,27

Contas de energia mensais						
	A/C split		GCHP vertical		GCHP horizontal	
	kWh	R\$	kWh	R\$	kWh	R\$
Abril	11,09	6,61	5,48	3,27	5,89	3,51
Mai	41,67	24,85	21,12	12,59	20,18	12,03
Junho	107,88	64,33	56,32	33,59	54,86	32,71
Julho	71,43	42,60	37,91	22,61	37,90	22,60
Agosto	179,93	107,30	92,35	55,08	93,99	56,05
Setembro	100,74	60,08	51,81	30,90	53,69	32,02
Outubro	13,42	8,00	6,35	3,79	6,01	3,59
Novembro	20,26	12,08	9,75	5,81	8,70	5,19
Dezembro	146,93	87,62	77,06	45,95	70,14	41,83
Taxa de juros						
Selic ^(c)	1,0720%/mês	Inflação ^(d)	0,5096%/mês	Real	0,5594%/mês	

(a) Ver composição de preços abaixo. Taxa de conversão 1º de março de 2017: US\$ 1,00 = R\$ 3,1080.

(b) CEEE, março de 2017.

(c) BCB, março de 2017.

(d) IBGE, para o ano de 2016.

(e) Custo *mínimo* estimado.

(f) O custo de instalação informado é uma referência média. Como a diferença entre os custos para as diferentes bombas de calor não é significativa frente aos demais custos, seu impacto é mínimo na viabilidade final e o valor assumido como igual para todos os casos.

Na época desta pesquisa, o pacote inteiro da 2,0 ton GCHP era vendido por US\$ 4.608,82 e era composto por: a própria bomba de calor (US\$ 2.274,09); uma bomba de água especial (US\$ 735,00); um distribuidor isolado para os tubos (US\$ 223,64); um kit de mangueiras para conectar o distribuidor à bomba de água e, esta, à bomba de calor (US\$ 240,10); um grande comprimento de tubos de PE; e a solução de etileno glicol. Os tubos de PE podem ser comprados localmente por R\$ 1,71/m e a solução não será usada porque o sistema foi projetado para operar apenas com água. Assim, o conjunto final custou US\$ 3.472,83 mais o comprimento de tubos (R\$ 228,46 para o circuito vertical e R\$ 455,20 para o horizontal de 2 tubos, o mais simples usado para o cálculo).

A Eq. 7.2 avalia a viabilidade em um tempo infinito, usando a média mensal das contas de energia ao longo do ano. Para a GCHP vertical:

$$\frac{Op_{AC} - Op_{GHCP,V}}{Inv_{GHCP,V} - Inv_{AC}} = \frac{56,35 - 29,42}{41.397,01 - 3.170,00} = 0,0704\%$$

Como esse valor é muito menor do que a taxa de juros real mensal de 0,5594%, o sistema GCHP vertical não é economicamente viável para o caso de referência – o que já era esperado devido ao custo elevado da perfuração. Como dito na seção 5.6.1, o custo real de execução do poço vertical pode ser ainda maior, mas esta análise mostra que mesmo com um custo um subestimado, uma GCHP vertical está longe de ser viável economicamente para o PCA.

Para a GCHP horizontal:

$$\frac{Op_{AC} - Op_{GHCP,H}}{Inv_{GHCP,H} - Inv_{AC}} = \frac{56,35 - 29,01}{12.523,76 - 3.170,00} = 0,2924\%$$

O mesmo resultado se aplica, e o sistema GCHP horizontal não é economicamente viável para o caso de referência – pelas condições de 2017. Contudo, este resultado não chega a ser uma surpresa, uma vez que a economia de GSHPs depende da escala de consumo, e o Protótipo Alvorada é, ao mesmo tempo, uma residência unifamiliar pequena e projetada para atingir uma eficiência energética maior do que habitações de interesse social comuns.

No entanto, é importante observar que a viabilidade econômica para o sistema horizontal já estava próxima se considerarmos que uma taxa de juros real de 0,2924% poderia ser alcançada apenas reduzindo-se a taxa Selic anual para 10,1% – o que efetivamente ocorreu ao longo de 2017. Esta é uma forte indicação do impacto da política econômica no estímulo para investimentos em novas tecnologias no Estado. Estes fatores são melhor explorados na análise de sensibilidade.

7.3 ANÁLISE DE SENSITIVIDADE

Através de manipulação das variáveis nas Equações 7.1 e 7.2, é possível verificar os valores mínimos ou máximos para cada de modo que a condição de viabilidade econômica seja satisfeita. Assim, mesmo que o investimento em uma GCHP não tenha resultado inicialmente como viável para o PCA, através desta análise de sensibilidade, pode-se investigar como as condições deveriam mudar ou em que outros casos o investimento seria viável. Esta análise foi feita inicialmente no início de 2017 e, posteriormente, atualizada pelas novas condições econômicas do início de 2018.

7.3.1 Análise pelos parâmetros de 2017

Esta análise foi feita para o sistema GCHP horizontal considerando viabilidade matemática (viável em um tempo infinito) e viabilidade prática (viável em 10 anos, o tempo máximo observado em anúncios de vendedores nos EUA e Europa, e em 50 anos, o tempo de vida útil mínimo de uma edificação pela NBR 15575). Os resultados aparecem na Tabela 30.

Todas as variáveis mostram que, em qualquer cenário, seria difícil que um sistema GCHP fosse economicamente viável para o Protótipo Alvorada, devido à sua pequena escala. Contudo, a informação realmente importante da Tabela 30 é mostrar a partir de que ponto outros casos de referência no Rio Grande do Sul se tornam economicamente viáveis (em relação ao PCA):

Tabela 30: Análise de sensibilidade para viabilidade do caso de referência – 2017.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Custos de operação e investimento – GCHP horizontal							
	Atual	Viabilidade em tempo ∞ (Eq. 7.2)		Viabilidade em 50 anos (Eq. 7.1)		Viabilidade em 10 anos (Eq. 7.1)	
Custo do sistema GCHP (R\$)	12.523,76	8.057,76	(-36%)	7.885,87	(-37%)	5.555,46	(-56%)
Tarifa elétrica (R\$/kWh)	0,596351	1,1412	(+91%)	1,1828	(+98%)	2,3384	(+292%)
Consumo anual de energia elétrica (kWh)^(a)	1.133,96	2.170,06	(+91%)	2.249,16	(+98%)	4.446,42	(+292%)
Taxa Selic (% ano)	13,65	10,08	(-25%)	8,98	(-33%)	-	^(b)
Inflação (% ano)	6,29	9,74	(+53%)	10,84	(+69%)	36,24	(+412%)

(a) Para uma situação atual em que a edificação usa um A/C.

(b) Mesmo uma taxa Selic de 0% não ofereceria uma viabilidade econômica em 10 anos apenas por si.

Variáveis econômicas:

Fatores como a taxa Selic, a inflação e a tarifa de energia estão fora do controle do projetista, mas sua análise de sensibilidade é muito útil para se estimar como políticas econômicas no futuro podem facilitar ou não a viabilidade econômica. A taxa Selic demonstrou ter um forte impacto, sendo a que exigiu a menor redução para levar à viabilidade econômica a longo prazo. Na época destes cálculos em 2017, já havia a previsão de um redução considerável ao longo do ano – o que efetivamente ocorreu e é mostrado na próximo capítulo.

Ao mesmo tempo, a tarifa de energia elétrica também era prevista de sofrer uma grande variação já em um curto prazo. De acordo com previsões da consultoria TR Soluções no início de 2017, a tarifa da CEEE poderia aumentar em até 25,41% em 2017 e em 6,5% em 2018 (GUERRA, 2017), devido a compensações dos investimentos das companhias de energia em infraestrutura de distribuição.

Custos de investimento:

O custo de uma unidade GCHP não é algo que deveria mudar consideravelmente em um futuro próximo, enquanto não houver mais avanços tecnológicos para baratear os custos de produção ou mais competição de mercado para forçar os preços a caírem. Porém, estímulos governamentais têm um grande poder de tornar a tecnologia mais acessível ao público. Nos EUA, há créditos para a compra de GSHPs de 10% para instalações comerciais e de 30% para residenciais, assim como para outras fontes de energia renovável (CLUTTER, 2017). Pela Tabela 30, um pequeno consumidor como o PCA necessitaria de 56% de abatimento para a viabilidade econômica em 10 anos, mas para a maioria dos clientes potenciais reais, com um consumo de energia maior, 30% de abatimento seriam mais do que o suficiente. No Brasil, uma medida similar e importante seria isentar as GCHPs de taxas de importação enquanto não forem produzidas localmente.

Demanda de energia:

A informação mais importante da Tabela, porém, é qual a demanda mínima de energia de um consumidor em condições similares para o qual GCHPs são economicamente viáveis. 4,4 MWh por ano são quatro vezes mais do que o consumo estimado para o PCA com um A/C, mas não são um valor alto para residências maiores ou para edificações comerciais ou institucionais. O ponto exato de virada depende da potência instantânea máxima, a qual também cresce com a edificação e pode exigir bombas de calor maiores e mais caras (embora o custo por capacidade diminua com a escala). De qualquer maneira, a avaliação econômica considerou uma GCHP de 2,0 ton (7.033 W), enquanto a demanda máxima era de 4.053 W, de modo que já havia uma folga. Assim, pode-se concluir que, na conjuntura econômica do início de 2017, GCHPs começavam a se tornar economicamente viáveis para demandas anuais acima de 4,4 MWh.

7.3.2 Análise pelos parâmetros de 2018

Durante o período decorrido entre a elaboração desta pesquisa (início de 2017) e a sua publicação (início de 2018), a evolução do cenário econômico brasileiro levou a uma grande alteração de alguns índices, especialmente a inflação calculada e a taxa Selic. Como já havia sido percebido anteriormente o grande impacto que isto poderia causar, uma nova análise de sensibilidade foi efetuada, atualizada para as novas condições.

Tabela 31: Variáveis para avaliação econômica do estudo de caso – 2018.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Custos de investimento						
	A/C split 18.000 BTU/h		2,0 ton GCHP vertical		2,0 ton GCHP horizontal	
Pacote bomba de calor	R\$ 2.560,00		R\$ 11.171,34 ^(a)		R\$ 11.398,09 ^(a)	
Instalação ^(d)	R\$ 375,00		R\$ 375,00		R\$ 375,00	
Escavações	-		R\$ 30.000,00 ^(e)		R\$ 900,00	
Total	R\$ 2.935,00		R\$ 41.546,34		R\$ 12.673,09	
Custos operacionais						
Eletricidade ^(b)	Tarifa 0,50542 R\$/kWh		Taxas ICMS(30%) + PIS/PASEP(0,61700%) + COFINS(2,84530%)			
	Total 0,759599 R\$/kWh					
Contas de energia mensais						
	A/C split		GCHP vertical		GCHP horizontal	
	kWh	R\$	kWh	R\$	kWh	R\$
Janeiro	203,10	154,28	110,09	83,62	104,59	79,45
Fevereiro	128,62	97,70	67,01	50,90	68,56	52,08
Março	108,88	82,71	56,68	43,05	59,15	44,93
Abril	11,09	8,42	5,48	4,16	5,89	4,47
Maiο	41,67	31,65	21,12	16,04	20,18	15,33
Junho	107,88	81,94	56,32	42,78	54,86	41,67
Julho	71,43	54,26	37,91	28,80	37,90	28,79
Agosto	179,93	136,67	92,35	70,15	93,99	71,40
Setembro	100,74	76,53	51,81	39,36	53,69	40,79
Outubro	13,42	10,19	6,35	4,82	6,01	4,57
Novembro	20,26	15,39	9,75	7,40	8,70	6,60
Dezembro	146,93	111,61	77,06	58,53	70,14	53,28

Taxa de juros					
Selic ^(c)	0,5654%/mês	Inflação ^(d)	0,2426%/mês	Real	0,3220%/mês

- (a) R\$ 10.942,89 (GCHP) + tubos. Taxa de conversão 1º de janeiro de 2018: US\$ 1,00 = R\$ 3,151.
 (b) CEEE, janeiro de 2018.
 (c) BCB, pela meta anual de 7,0%/ano em janeiro de 2018.
 (d) IBGE, IPCA geral para o ano de 2017.
 (e) Custo *mínimo* estimado.
 (f) O custo de instalação informado é uma referência média. Como a diferença entre os custos para as diferentes bombas de calor não é significativa frente aos demais custos, seu impacto é mínimo na viabilidade final e o valor assumido como igual para todos os casos.

Os custos de investimento em si tiveram pouca alteração no período, sendo mais impactados pela variação da cotação do dólar. Neste novo cenário, a viabilidade a longo prazo da GCHP vertical é dada por (Eq. 7.2):

$$\frac{Op_{AC} - Op_{GHCP,V}}{Inv_{GHCP,V} - Inv_{AC}} = \frac{71,78 - 37,47}{41.546,34 - 2.935,00} = 0,0902\% \ll i_r = 0,3220\%$$

e para a GCHP horizontal:

$$\frac{Op_{AC} - Op_{GHCP,V}}{Inv_{GHCP,V} - Inv_{AC}} = \frac{71,78 - 36,95}{12.673,09 - 2.935,00} = 0,3577\% > i_r = 0,3220\%$$

Como este valor indica e como já era previsto no início de 2017, a GCHP horizontal agora se torna viável economicamente para o PCA nas condições atuais (embora ainda necessitando um longo período para o retorno do investimento, cerca de 718 meses, ou quase 60 anos). Quanto à análise de sensibilidade:

Tabela 32: Análise de sensibilidade para viabilidade do caso de referência – 2018.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Custos de operação e investimento – GCHP horizontal						
	Atual	Varição desde 2017	Viabilidade em 50 anos (Eq. 7.1)	Viabilidade em 10 anos (Eq. 7.1)		
Custo do sistema GCHP (R\$)	12.673,09	+1,2%	12.179,56	(-4%)	6.397,39	(-50%)
Tarifa elétrica (R\$/kWh)	0,759599	+27,4%	0,8002	(+5%)	2,1364	(+181%)
Consumo anual de energia (kWh)^(a)	1.133,96	-	1.194,49	(+5%)	3.189,29	(+181%)
Taxa Selic (% ano)	7,00	-48,7%	6,69	(-4%)	-	^(b)
Inflação (% ano)	2,95	-53,1%	3,25	(+10%)	24,27	(+653%)

(a) Para uma situação atual em que a edificação usa um A/C.

(b) Mesmo uma taxa Selic de 0% não ofereceria uma viabilidade econômica em 10 anos apenas por si.

Como se percebe, o aumento da tarifa de energia elétrica em 2017 confirmou as expectativas, elevando os gastos com energia em 27,4% em 1 ano. Ao mesmo tempo, a redução em quase pela metade da taxa Selic tornou o investimento muito mais acessível, apesar da redução equivalente da inflação. Enquanto que, no início de 2017, estimou-se que GCHPs começariam a se tornar economicamente viáveis em Porto Alegre para demandas anuais acima de 4,4 MWh, o valor se reduziu agora para cerca de 3,2 MWh.

7.3.3 Influência da definição de conforto térmico

Para uma comparação simples, as demandas de energia e contas de eletricidade também foram simuladas seguindo a mesma metodologia, mas alterando-se apenas o conforto térmico para a definição do ASHRAE 55 Standard – aproximadamente entre 20 e 24 °C (Tabela 33). Esta simples mudança quase duplica o consumo de energia, especialmente por um gasto muito maior com aquecimento. Apenas esta diferença também reduz o período de retorno do investimento no PCA para 206 meses, ou cerca de 17 anos.

Tabela 33: Impacto da definição de conforto térmico.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

	Demandas e tarifas de energia mensais – ASHRAE 55 comparada à faixa 18-25 °C					
	A/C split			GCHP horizontal		
	kWh	R\$	Increase	kWh	R\$	Increase
Janeiro	269,12	204,42	+33%	142,56	108,29	+36%
Fevereiro	185,28	140,74	+44%	102,63	77,96	+50%
Março	166,18	126,23	+53%	93,20	70,80	+58%
Abril	37,29	28,32	+236%	19,69	14,96	+235%
Maio	172,22	130,82	+313%	85,04	64,59	+321%
Junho	247,05	187,66	+129%	126,18	95,84	+130%
Julho	204,92	155,65	+187%	108,52	82,43	+186%
Agosto	329,76	250,48	+83%	179,87	136,63	+91%
Setembro	232,47	176,59	+131%	127,33	96,72	+137%
Outubro	64,74	49,18	+382%	32,58	24,75	+442%
Novembro	50,70	38,51	+150%	24,24	18,41	+179%
Dezembro	208,69	158,52	+42%	103,04	78,27	+47%

Demandas e tarifas de energia mensais – ASHRAE 55 comparada à faixa 18-25 °C						
	A/C split			GCHP horizontal		
	kWh	R\$	Increase	kWh	R\$	Increase
Anual	2.168,41	1.647,13	+91%	1.144,88	869,65,75	+96%

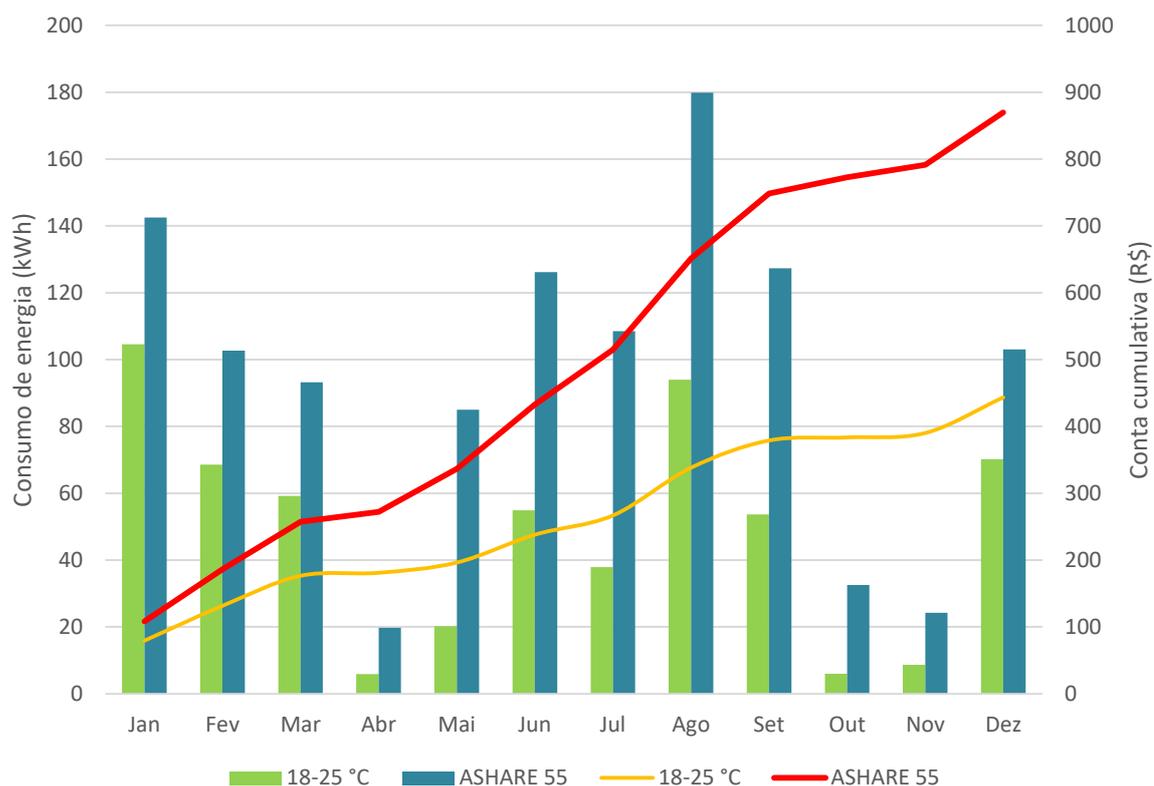


Figura 51: Impacto da definição de conforto térmico – GCHPh.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

7.3.4 Influência do tipo de solo

Ao redor do Estado do Rio Grande do Sul, ou mesmo apenas na cidade de Porto Alegre, certamente pode ser encontrada uma grande variedade de tipos de solos, com diferentes características. Para os sistemas de GCHP, porém, são as propriedades térmicas e o teor de umidade as mais importantes, devido ao seu impacto no dimensionamento do circuito enterrado. Mantendo-se fixas as *ELT* (e assim, as eficiências), variações nestas propriedades podem levar a diferentes comprimentos de circuito para permitir a mesma troca térmica.

Assim como para a análise da influência do conforto térmico, esta análise de sensibilidade foi feita para o GCHP horizontal. Foram comparados as propriedades térmicas típicas para areias e argilas (Tabela 13) com o caso de referência (Tabela 25) para o mesmo nível de umidade e observados o impacto no comprimento das trincheiras, do tubos e no custo final do sistema.

Tabela 34: Impacto das propriedades térmicas do solo.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Tipo de solo	Seco		15% de umidade		Circuito enterrado 2 tubos/espiral 10 passos		Sistema GCHP completo 2 tubos/espiral 10 passos	
	ρ (kg/m ³)	κ (W/m.K)	α (m ² /d)	Trincheira (m)	Tubos (m)	Custo (R\$) ^(a)	Varição	
Areias (0,075 – 5 mm)	1920	3,29	0,099	104,3/45,7	209/457	12.574,60/12.99,08	-0,8%/-1,8%	
	1600	2,42	0,093	140,5/61,5	281/615	12.698,40/13.270,21	+0,2%/+0,5%	
	1280	1,56	0,070	209,1/91,6	418/916	12.933,01/13.784,01	+2,2%/+4,6%	
Caso de referência	1600	2,5	0,08	133,1/58,3	266/583	12.673,09/13.214,78	- / -	
Argilas (<0,075 mm)	1920	1,64	0,051	189,6/83,0	379/830	12.866,32/13.637,96	+1,6%/+3,4%	
	1600	1,13	0,039	263,6 ^(b) /115,5	527/1.155	13.119,40/14.192,20	+3,8%/+7,9%	
	1280	0,81	0,037	364,6 ^(b) /159,7	729/1.597	13.464,82/14.948,67	+6,7%/+14,1%	

(a) Considerando todas as escavações feitas em apenas um dia.

(b) Em circuitos mais longos, a única opção deveria ser um circuito espiral, a fim de evitar maiores escavações.

Como indicam os cálculos, variações na condutividade ou difusividade do solo causam grande impacto na dimensão do circuito enterrado, em até mais de três vezes entre os extremos de tipo de partícula. Porém, exceto para solos muito ricos em argila, o impacto direto nos custos finais para um projeto de pequeno ou médio porte ainda é pequeno, uma vez que, para GCHPs horizontais, o custo do circuito enterrado em si é baixo frente ao custo da bomba. Mesmo para grandes variações no comprimento dos tubos, o maior impacto financeiro está na logística da escavadeira, uma vez que seu custo é por tempo de execução.

Esta análise confirma as observações de Kavanaugh e Rafferty (2014) de que, para projetos menores, devido ao custo elevado de um teste térmico para valores precisos, a adoção de valores conservativos (mesmo resultando em um sistema um pouco sobredimensionado) se torna mais viável economicamente.

7.4 ROTEIRO PARA PROJETO E VIABILIDADE

O processo desenvolvido durante este trabalho para o projeto de GSHPs e avaliação da sua viabilidade comparada a outro sistema de condicionamento térmico pode ser usado como guia para novos casos, especialmente por novos projetistas no campo. A Figura 52 esquematiza todos os passos:

1. **Definições básicas do caso:** Correspondem às informações mínimas fornecidas pelo cliente. Para o projeto de GSHP: especificações da edificação, sua localização, e os requisitos de uso e conforto. Caso se queira uma avaliação econômica, também o panorama presente ou futuro e qual o sistema para comparação (como um A/C).
2. **Aquisição de dados:** São as variáveis de entrada utilizadas pelo projetista. Para o projeto: arquivo climático, propriedades do solo, faixa de operação, padrão de ocupação, forma e materiais da edificação. Para uma avaliação econômica, também a tarifa de energia, custo das bombas, serviços de instalação e escavação, taxa nominal de juros e inflação. O Capítulo 5 orienta o levantamento para o Brasil e Rio Grande do Sul.
3. **Modelagem e simulação energética:** Utiliza as variáveis de entrada do projeto na obtenção das cargas térmicas e potências máximas exigidas pela edificação. No caso de estes valores já serem conhecidos ou puderem ser diretamente estimados, eles serão as variáveis de entrada.
4. **Projeto conceitual:** Especificação das capacidades nominais da GSHP (e do sistema de referência, no caso de um estudo de viabilidade) e dimensionamento do circuito enterrado (Capítulo 6).
5. **Avaliação de desempenho:** Estimativa do consumo de energia elétrica e da eficiência (Capítulo 6).
6. **Estimativa dos custos de investimento e de operação:** Orçamento a partir dos custos unitários e dimensionamento e conta de energia pela estimativa do consumo de energia elétrica e tarifa (Capítulo 7).
7. **Estudo de viabilidade:** Comparação do retorno econômico a longo prazo. Resultados podem determinar a aprovação do projeto ou mudança em variáveis do passo 2 para garantir viabilidade (Capítulo 7).

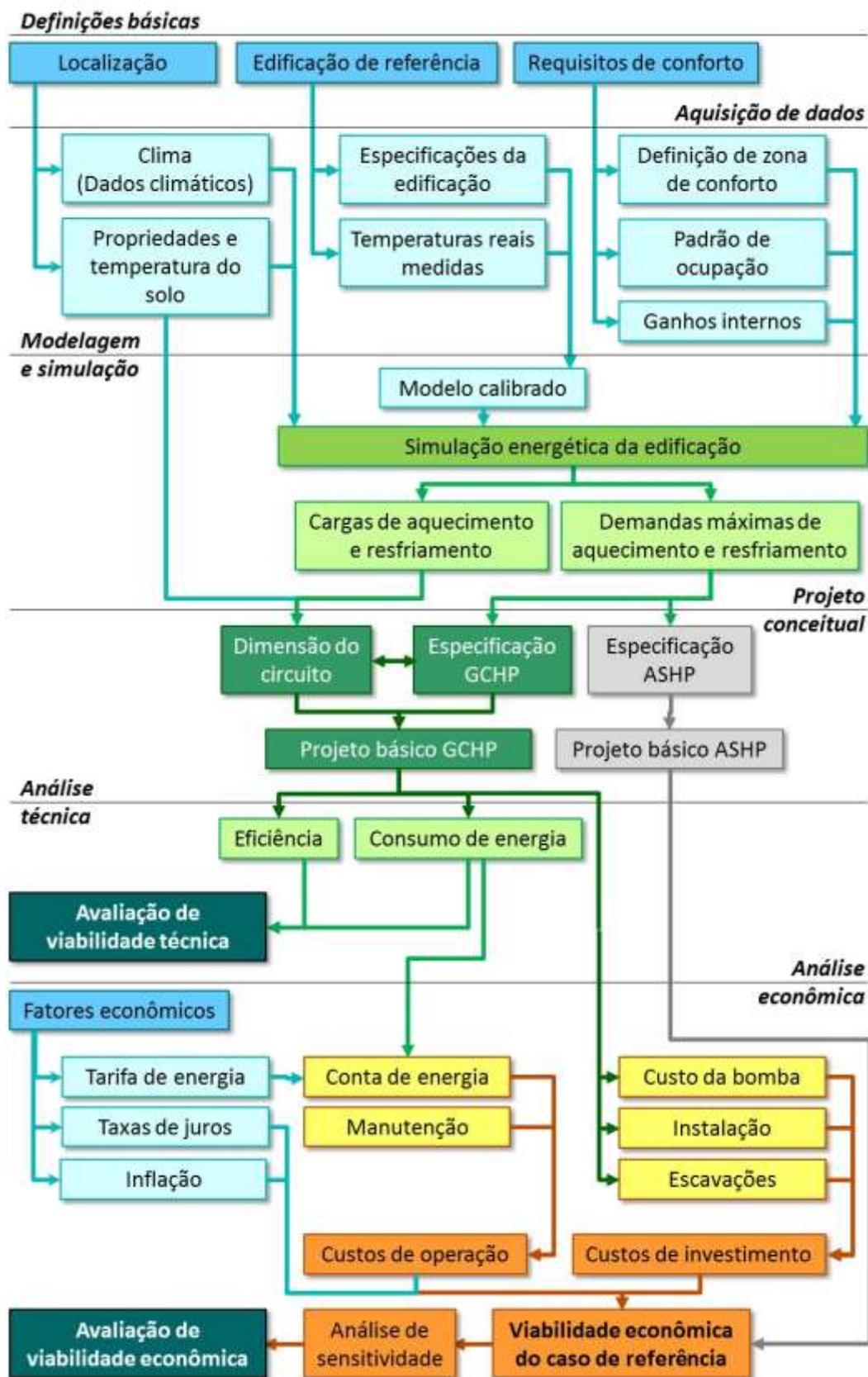


Figura 52: Roteiro de projeto e avaliação técnico-econômica.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

8 CONCLUSÕES

8.1 LIÇÕES APRENDIDAS

O estudo confirmou que o clima do Rio Grande do Sul proporciona condições para um sistema geotérmico operar com boa eficiência e gerar uma redução considerável no consumo de energia. No caso de referência, o *COP* anual efetivo da GCHP foi mais que o dobro da ASHP mais eficiente (6,40 para 3,07), resultando em cerca de metade do consumo de energia elétrica. Uma vez que o *COP* está relacionado especialmente às temperaturas de operação, mais do que à edificação em si, pode ser assumido que eficiências similares seriam encontradas em diferentes casos na mesma área. Em relação aos sistemas de condicionamento mais habituais (A/Cs menos eficientes e aquecimento via resistência elétrica), a economia de energia seria ainda maior. É notável também que os valores de *COP* alcançados estavam perto dos máximos encontrados na literatura, o que concorda com o conhecimento de que a eficiência de bombas de calor em geral é mais alta em climas mais amenos. Para o clima de Porto Alegre, os valores de *COP* mais elevados foram encontrados para a condição de resfriamento no pico do verão.

A simulação energética da edificação demonstrou que a escolha da faixa de conforto produz um impacto considerável nas demandas de aquecimento e resfriamento, sendo o caso mais claro a demanda muito maior por aquecimento solicitada pela ASHRAE 55 do que pela carta da NBR15220. Em qualquer situação, porém, estas demandas são suficientemente balanceadas para que uma sobrecarga da temperatura do solo dificilmente seja uma preocupação. O uso controlado de ventilação natural certamente reduziria as cargas de resfriamento, enquanto investimentos em um melhor isolamento térmico teriam o potencial de reduzir ambas as demandas, e os dois fatores deveriam ser inclusos em uma análise mais aprofundada.

Quanto às características do solo, na região metropolitana de Porto Alegre, a combinação típica de um substrato granítico com um solo rico em areia e úmido a saturado em água oferece boa condutividade e difusividade térmica. A dimensão do circuito enterrado pode variar bastante em cada tipo de solo, mas, em geral, com pouco impacto econômico na viabilidade econômica final do sistema.

De acordo com a literatura, o investimento inicial mais elevado de bombas de calor geotérmicas é difícil de ser compensado para pequenas residências em qualquer lugar do mundo, e este também foi o caso para o Protótipo Alvorada. Ainda assim, o limite inferior de viabilidade (10 anos), estimado entre 3,2 MWh de energia consumida anualmente para condicionamento térmico, é relativamente baixo para qualquer edificação (ou conjunto de edificações) com um sistema HVAC central. Para consumidores de grande escala no Rio Grande do Sul, o retorno pode ser ainda mais rápido, mesmo na atual conjuntura econômica.

Para GCHP verticais, a instalação exige equipamentos especiais que não foram encontrados localmente. A estimativa a partir de equipamentos similares indicou que, ao menos atualmente, os custos deverão ser tão elevados que dificilmente viabilizariam a sua implantação, mesmo com altas demandas. Por outro lado, para sistemas de GCHP horizontais, o circuito enterrado pode ser construído com materiais disponíveis localmente e os custos de material e instalação foram baixos, comparados aos da bomba de calor em si. Como esta última ainda necessita ser importada, seu custo é diretamente impactado pela desvalorização do real e por taxas de importação. Porém, como alguns dos fabricantes de ar condicionado presentes no Brasil já produzem bombas de calor geotérmicas em fábricas no exterior, é possível que a maior barreira para as produzir também no país pode ser apenas o surgimento de uma demanda de mercado.

Entretanto, embora a viabilidade econômica de GCHPs horizontais seja promissora, o tamanho do circuito enterrado ainda é uma barreira, especialmente em terrenos urbanos. O uso de tubos em espirais proporcionou neste caso uma considerável redução no dimensionamento, a qual pode ser ainda maior com o suporte técnico de casos reais locais no futuro.

Um dos objetivos secundários deste trabalho, a modelagem e calibração do PCA disponibilizou um modelo computacional confiável de uma habitação de interesse social, que pode servir de ambiente de teste para novas hipóteses e encorajar mais experimentos futuros sobre o protótipo. Por fim, o processo de trabalho permitiu a montagem de um guia para orientação de novos projetos de GSHPs, sua avaliação de custo e de viabilidade econômica, direcionado especialmente a novos projetistas no campo. Embora os passos para o levantamento de dados estejam focados no Brasil e Rio Grande do Sul, eles podem ser facilmente adaptados a outras situações. A análise de sensibilidade, especialmente, pode servir de base para outras estimativas simplificadas de viabilidade econômica na mesma área.

8.2 PESQUISAS FUTURAS

Para simulações mais realistas, seria essencial incluir o efeito da ventilação natural da demanda de energia, especialmente no caso de aplicações residenciais, onde normalmente esta é a primeira medida tomada pelo usuário para controlar o conforto térmico. Alguns estudos nacionais já lidaram com este efeito, como o trabalho recente de Sorgato *et al.* (2016), e estes poderiam ser relacionados a este trabalho para verificar o impacto na viabilidade econômica de bombas de calor geotérmicas.

Outra pesquisa relevante, pelas conclusões da seção anterior, seria um estudo similar ao presente trabalho, mas orientado a consumidores muito maiores, como escolas ou edifícios de escritórios. Não apenas isto serviria para conclusões mais seguras quanto à viabilidade da tecnologia em diferentes contextos, como também traria elementos extras ao projeto, como o arranjo de mais de uma bomba de calor no mesmo sistema e a configuração de circuitos enterrados muito maiores em diferentes arranjos. Em sistemas maiores, também é possível que circuitos verticais possam se tornar mais viáveis do que horizontais, o que é outra variável a ser comparada.

O uso de *energy piles*, em vez de circuitos enterrados separados da edificação, pode ser uma grande oportunidade para a adoção de bombas geotérmicas em edificações urbanas, e por isso mereceriam também uma avaliação específica. Ao se aproveitarem da subestrutura de uma edificação, elas poderiam superar a limitação do espaço exigido por circuitos horizontais e do alto custo de circuitos verticais.

O impacto da combinação de sistemas complementares às bombas de calor é outro possível tema de pesquisa. Sistemas híbridos poderiam facilitar a viabilidade em diferentes situações, e a combinação com um *radiant heating and cooling* para distribuição do calor interno poderia levar a eficiências ainda maiores.

Finalmente, uma elaboração mais avançada do método de avaliação desenvolvido neste trabalho poderia levar a um algoritmo de seleção e orçamentação de sistemas de climatização, o qual inclusive poderia ser automatizado em um software de seleção. Esta certamente se tornaria uma ferramenta valiosa para a adoção de escolhas de projeto mais eficientes e disseminação mais rápida da tecnologia onde viável.

8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como indicado no estudo de Bodach e Hamhaber (2010), as barreiras obstruindo o progresso em direção a uma maior eficiência energética em habitações de interesse social (e de edificações em geral) no Brasil são derivadas de uma combinação de: elevados custos de investimento, baixa consciência quanto a outras alternativas, baixa capacitação e uma indústria fragmentada.

Iniciativas para superar estes obstáculos dificilmente partirão da indústria, já que diminuir o consumo de energia de uma edificação não é uma preocupação do construtor, cujo interesse é limitado basicamente à fase de construção, não aos custos de ciclo de vida posteriores. A conta de energia e, logo, o consumo, é uma preocupação do usuário, e portanto é para eles que a consciência quanto a alternativas existentes para poupar energia (e dinheiro) deveriam ser especialmente direcionadas. No entanto, é fundamental que o setor de construção tenha o conhecimento e treinamento quanto a estas alternativas para que possam oferecê-las aos seus clientes.

Arquitetos e engenheiros, acadêmicos e profissionais, são, contudo, os que deveriam estar na vanguarda deste movimento e os mais comprometidos com o aumento da eficiência energética de edificações. A eficiência energética de edificações, porém, é um campo que ainda recebe pouca ênfase na sua formação educacional, e foi somente em 2000 que princípios bioclimáticos começaram a entrar no curriculum de escolas de Arquitetura (BODACH; HAMHABER, 2010). Para o autor, pessoalmente, este trabalho representou uma tentativa de reconectar conceitos de Arquitetura, Engenharia, Termodinâmica e Economia (e mesmo um pouco de Geologia e Geopolítica) a partir de pesquisas acadêmicas e da experiência prática em um projeto abrangente, com a esperança de alcançar profissionais em diversos campos e estimular uma cooperação em direção à eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho**. São Paulo, 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3:2005 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. São Paulo, 2013.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em <http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2013/0000022/0000006/art00008?token=004f10bb383a4b3b2570507b6c5f6c6a2d7c49665d2a726e2d58464340592f3f3b576b0d0e0f4ce>, acessado em 20 de fevereiro de 2017.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. **Standard 55: Thermal Environment Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2010.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. **2011 ASHRAE Handbook – Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications – SI Edition**. Atlanta: ASHRAE, 2011.

BAYER, P.; SANER, D.; BOLAY, S.; RYBACH, L.; BLUM, P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 16, p. 1256-1267, 2012.

BBC Brasil. **Brasil se prepara para um verão de temperaturas extremas**. Publicado em 7 de outubro de 2015. Disponível em http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/10/150930_verao_calor_rj_rm, acessado em 27 de julho de 2016.

BBC (by Matt McGrath). **Climate change: 2015 'shattered' global temperature record by wide margin**. Publicado em 20 de janeiro de 2016. Disponível em <http://www.bbc.com/news/science-environment-35354579>, acessado em 27 de julho de 2016.

BCB – Banco Central do Brasil. **Taxa Selic**. Disponível em <http://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/n/SELICTAXA>, acessado em 20 de fevereiro de 2017.

BERNIER, M. Closed-loop ground-coupled heat pump systems. **ASHRAE Journal**, n. 48, v. 9, p. 13–24, 2006.

BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy Policy**, n. 38, p. 7898-7910, 2010.

BOSE, J.E.; PARKER, J.D.; McQUISTON, F.C. **Design/data manual for closed-loop ground coupled heat pump systems**. Oklahoma State University for ASHRAE, 1985.

BOSE, J.E.; SMITH, M.D.; SPITLER, J.D. Advances in ground source heat pump systems — an international overview. **Proceedings of the 7th International Conference on Energy Agency Heat Pump**. Beijing, 2002.

BRASIL. Lei Nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2001. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm, acessado em 27 de julho de 2016.

BRUM, R. S.; RODRIGUES, M. K.; RAMALHO, J. V. A.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; dos SANTOS, E. D. On the design of two EAHE assemblies with four ducts. **Defect and Diffusion Forum**, v. 372, p. 31-39, 2017.

BULLARD, E. Basic theories. **Geothermal energy – Review of research and development**. UNESCO, Paris, 1973.

BULLITT Foundation. The Heat is On - Ground-source heat pump and in-floor radiant system heat the building extremely efficiently. **Bullitt Center – Building Features**. Publicado em outubro de 2013. Disponível em <http://www.bullittcenter.org/building/building-features/the-heat-is-on/>, acessado em 27 de julho de 2016.

CAPOZZA, A.; De CARLI, M.; ZARRELLA, A. Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: A literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. **Energy and Buildings**, n. 55, p. 369-379, 2012.

CAPOZZA, A.; De CARLI, M.; ZARRELLA, A. Investigations on the influence of aquifers on the ground temperature in ground-source heat pump operation. **Applied Energy**, n. 107, 2013.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J.C. Jaeger. **Conduction of Heat in Solids**. Oxford: Clarendon Press, 1947.

CASASSO, A.; SETHI, R. Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis. **Renewable Energy**, n. 62, p. 737-746, 2014.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Custos e Tarifas**. Disponível em <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1782>, acessado em 7 de fevereiro de 2017.

CEIC – Centro Integrado de Comando. **Calor atinge marcas excepcionais e históricas**. Publicado em 06 de fevereiro de 2014. Disponível em http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?reg=794&p_secao=4, acessado em 27 de julho de 2016.

CF Solar. **Ground Source Heat Pumps**. Disponível em <http://www.cfsolarworld.com/wp-content/uploads/2014/11/GS-2.jpg>, acessado em 20 de fevereiro de 2017.

CHIASSON, A. D.; YAVUZTURK, C. C. Assessment of the viability of hybrid geothermal heat pump systems with solar thermal collectors. **ASHRAE Transactions**, n. 109, p. 487–500, 2003.

CHINELATTO, F. P. **Análise de sistemas de climatização com geotermia**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, USP, 2013.

CLUTTER, T. Reed Bill Will Reinstate and Extend Federal Tax Credits for Geo. **GeoExchange – Geothermal Heating & Cooling (LinkedIn Group)**. Disponível em <https://www.linkedin.com/groups/1203517/1203517-6238041392418029570>, acessado em 1º de março de 2017.

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) – Serviço Geológico do Brasil. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Porto Alegre**. Programa Geologia do Brasil, 2004. Disponível em <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/5001>, acessado em 27 de julho de 2016.

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) – Serviço Geológico do Brasil. **Programa Geologia do Brasil – PGB**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Programa-Geologia-do-Brasil---PGB-79.html>, acessado em 27 de julho de 2016.

CURTIS, R.; LUND, J.; SANNER, B.; RYBACH, L.; HELLSTROM, G. Ground source heat pumps e geothermal energy for anyone, anywhere: current worldwide activity. **World Geothermal Congress**. Antalya, Turkey, 2005.

CUCINELLA, M. **Mario Cucinella Architects - Sustainability**. Disponível em <http://www.mcarchitects.it/sostenibilita>, acessado em 27 de julho de 2016.

D'ANGELIS, W. R.; VEIGA, J. Habitação e Acampamentos Kaingang hoje e no passado. **Cadernos do CEOM**, n. 18, p. 213-242, Unochapcó/Argos, 2003.

Di PIPPO, R. Industrial developments in geothermal power production. **Geothermal Resources Council Bulletin**, n. 17, 1988.

DICKSON, M. H.; FANELLI, M. What is geothermal energy? **International Geothermal Association website**. Preparado em fevereiro de 2004. Disponível em https://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy.html, acessado em 27 de julho de 2016.

DOE – U. S. Department of Energy. **EnergyPlus Version 8.6 Documentation**. NREL – National Renewable Energy Laboratory. Publicado em 30 de setembro de 2016. Disponível em <https://energyplus.net/documentation>, acessado em 20 de fevereiro de 2017.

DOE – U. S. Department of Energy. **Weather Data for Simulation**. Disponível em <https://energyplus.net/weather/simulation>, acessado em 24 de setembro de 2017.

EnerGuide. **Heating and cooling with a heat pump**. Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency, 2015. Disponível em <http://www.nrcan.gc.ca/energy/publications/efficiency/residential/heating-heat-pump/6817>, acessado em 27 de julho de 2016.

EUR-Lex. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. **Official Journal of the European Union**. L 140, v. 52, p. 16–62, 5 de junho de 2009. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj>, acessado em 7 de fevereiro de 2017.

FISHER, I. **The Theory of Interest**. New York: A. M. Kelly, 1930.

FLORIDES, G. A.; POULOUPATIS, P. D.; KALOGIROU, S. A.; MESSARITIS, V.; PANAYIDES, I.; ZOMENI, Z.; PARTASIDES, G.; LIZIDES, A.; SOPHOCLEOUS, E.;

KOUTSOUMPAS, K. The geothermal characteristics of the ground and the potential of using ground coupled heat pumps in Cyprus. **Energy**, n. 36, p. 5027-5036, 2011.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. – Departamento de Apoio e Controle Técnico. **Relatório DCT.C.15.001.2007-R0 - Caixa Econômica Federal - Avaliações de Sistemas Construtivos e Estabelecimento de Requisitos para Edificações Térreas com Paredes de Concreto Armado**. DCT.C, Laboratório de Solos, janeiro de 2007.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, n. 18, p. 11-23, 1992.

GLASSLEY, W. **Geothermal Energy**. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 2015.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2^a ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

GU, Y.; O'NEAL, D. L. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-Tubes used in ground-coupled heat pumps. **ASHRAE Trans.**, n. 104, p. 347–355, 1998.

GUERRA, G. Aumento da energia elétrica pode superar 25% no Rio Grande do Sul em 2017. **Acerto de Contas – Gaúcha Blog News**. Publicado em janeiro de 2017. Disponível em <http://wp.clicrbs.com.br/acertodecontas/2017/01/24/aumento-da-energia-eletrica-pode-superar-25-no-rio-grande-do-sul-em-2017/?topo=52,1,1,,171,e171>, acessado em 7 de fevereiro de 2017.

HANOVA, J.; DOWLATABADI, Hadi. Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology. **Environmental Research Letters**, v. 2, n. 4, 2007.

HUGHES, P. J. Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps: Market Status, Barriers to Adoption, and Actions to Overcome Barriers. **US Department of Energy Publications**. Paper 15, 2008. Disponível em <http://digitalcommons.unl.edu/usdoepub/15>, acessado em 27 de julho de 2016.

HUGHES, P. J.; SHONDER, J. A. **The evaluation of a 4000-home geothermal heat pump retrofit at Fort Polk. Louisiana: Final Report**. Oak Ridge National Laboratory, TN. ORNL/CON-460, 1998.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA e Índice Nacional de Preços ao Consumidor – INPC**. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultinpc.shtm, acessado em 7 de fevereiro de 2017.

IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. **Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado**. Serie Calificación de Eficiencia Energética de Edificios. Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España, 2012. Disponível em http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_14_Guia_tecnica_diseno_de_sistemas_de_intercambio_geotermico_de_circuito_cerrado_1d03dc08.pdf, acessado em 27 de julho de 2016.

IEA – International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives 2017**. OECD/IEA, 2017. Disponível em <http://www.iea.org/etp2017/summary/>, acessado em 24 de setembro de 2017.

INGERSOLL, L. R.; ZOBEL, O. J.; INGERSOLL, A. C.. 1954. **Heat Conduction: With Engineering and Geological Applications**. 2nd ed. New York: McGraw Hill, 1954.

INGRAM's Water and Air Equipment. **Geothermal Heat Pump with Install Package**. Disponível em http://ingramswaterandair.com/geothermal-heat-pump-geothermal-with-install-package-c-45_82_347.html, acessado em 7 de fevereiro de 2017.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Anomalias de Temperaturas Médias Trimestrais**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/anomaliaTempMediaTrimestral>, acessado em 5 de abril de 2017.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>, acessado em 27 de julho de 2016.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria Nº 18, de 16 de janeiro de 2012 - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>, acessado em 27 de julho de 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. IPCC Fourth Assessment Report**. 2007. Disponível em https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-es.html, acessado em 27 de julho de 2016.

KAVANAUGH, S. P. Ground-coupled heat pumps for commercial building. **ASHRAE Journal**, n. 34, p. 30-37, 1992.

KAVANAUGH, S. P.; CALVERT, T.H. **Performance of ground source heat pumps in North Alabama – Final Report**. Alabama Universities and Tennessee Valley Authority Research Consortium, University of Alabama, Tuscaloosa, 1995.

KAVANAUGH, S. P.; RAFFERTY, Kevin D. **Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings**. Atlanta: ASHRAE, 1997.

KAVANAUGH, S. P.; RAFFERTY, Kevin D. **Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems**. Atlanta: ASHRAE, 2014.

KERN, D. **Process Heat Transfer**. International Student Edition, 21st print. McGraw-Hill, 1983.

KHARSEH, M. Ground-Source Heat Pumps and Energy Saving. *In*: MITROVIC, Jovan (Ed). **Heat Exchangers - Basics Design Applications**. InTech. 2012. Disponível em <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-application/ground-source-heat-pumps-and-energy-saving>, acessado em 27 de julho de 2016.

KUHN, E. A. **Avaliação ambiental do protótipo de habitação de interesse social Alvorada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006. Disponível em <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10591>, acessado em 27 de julho de 2016.

KUHN, E. A.; SATTTLER, M. A. Habitações de baixo custo mais sustentáveis. **Téchne**, n. 131, 2008. Disponível em <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/131/artigo287526-1.aspx>, acessado em 27 de julho de 2016.

KUREVIJA, T.; VULIN, D.; KRAPEC, V. Effect of borehole array geometry and thermal interferences on geothermal heat pump system. **Energy Conversion and Management**, n. 60, p. 134-142, 2012.

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética de Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>, acessado em 27 de julho de 2016.

LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques – an applications guide**. AIVC, Bracknell, UK, 1986.

LOFTNESS, V.; HAASE, D. (editors). **Sustainable Built Environments**. New York: Springer, 2013.

LUND, J. W.; SANNER, B.; RYBACH, L.; CURTIS, R.; HELLSTRÖM, G. Geothermal (ground-source) heat pumps: a world review. **GHC Bulletin**, 2004.

LUND, J. W.; FREESTON, D. H.; BOYD, T. L. Direct utilization of geothermal energy 2010 energy review. **Geothermics**, n. 40, p. 159-180, 2011.

LUND, J. W.; BOYD, T. L. Direct utilization of geothermal energy 2015 energy review. **Geothermics**, n. 60, p. 66-93, 2016.

MARCH, S.; SMITH, G. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, n. 15, p. 251–266, 1995.

MARITZ, G. **Residential use of shallow geothermal and solar energy in South Africa: a comparative analysis**. Research Report Proposal (Master of Business Administration Degree) – The Graduate School of Business, University of Cape Town, 2011.

MELIÁ, B. **O índio no Rio Grande do Sul**. Coordenação de Pastoral Indígena Interdiocesano Norte do RS, Frederico Westphalen, 1984.

MOONEY, C.; DENNIS, B. The world is about to install 700 million air conditioners. Here's what that means for the climate. **The Washington Post**, 31 de maio de 2016. Disponível em https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2016/05/31/the-world-is-about-to-install-700-million-air-conditioners-heres-what-that-means-for-the-climate/?utm_term=.7409cde24838, acessado em 27 de julho de 2016.

MORELLO, A. **Avaliação do Comportamento Térmico do Protótipo Habitacional Alvorada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005. Disponível em <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4795>, acessado em 27 de julho de 2016.

MORELLO, A.; SATTTLER, M. A. Avaliação do comportamento térmico do protótipo habitacional Alvorada – Um ano de medições in loco. **Anais do XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ENTAC**. Florianópolis, 2006.

MORRONE, B.; COPPOLA, G.; RAUCCI, V. Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates. **Energy Conversion and Management**, n. 88, p. 189-198, 2014.

MUÑOZ, M.; GARAT, P.; FLORES-AQUEVEQUE, V.; VARGAS, G.; REBOLLEDO, S.; SEPÚLVEDA, S.; DANIELE, L.; MORATA, D.; PARADA, M. Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin-Chile (33.5 °S). **Renewable Energy**, n. 76, p. 186-195, 2015.

MUSSKOPF, D. B. **Estudos exploratórios sobre ventilação natural por tubos enterrados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006. Disponível em <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11803>, acessado em 27 de julho de 2016.

NETO, A. H.; VOLTANI, E. R. Resfriamento e aquecimento geotérmico. **Portal Engenharia e Arquitetura**. Nova Técnica Editorial, 2010. Disponível em <http://www.engenhariaearquitectura.com.br/noticias/883/Resfriamento-e-aquecimento-geotermico.aspx>, acessado em 27 de julho de 2013.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration – National Centers for Environmental Information. **State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2016**. Janeiro de 2017. Disponível em <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201613>, acessado em 20 de fevereiro de 2017.

OLGYAY, V. **Design with Climate**. Princeton University Press, 1963.

OMER, A. M. Ground-source heat pumps systems and applications. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, n. 12, p. 344-371, 2008.

OWEN, C. Design research: building the knowledge base. **Journal of the Japanese Society for the Science of Design**, v. 5, n. 2, p. 36–45, 1997.

OZGENER, O.; HEPBASLI, A. Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study. **Building and Environment**, v. 40, n. 8, p. 1040-1050, 2005.

PFAFFEROTT, J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency. **Energy and Buildings**, n. 35, p. 971-983, 2003.

PORADA, B. The 'World's Greenest Commercial' Building Opens in Seattle Today. **ArchDaily**. Publicado em 22 de abril de 2013. Disponível em <http://www.archdaily.com/363007/the-world-s-greenest-commercial-building-opens-in-seattle-today/>, acessado em 27 de julho de 2016.

RAABE, S. Future's fuel right under our feet. **The Denver Post**, 26 de outubro de 2007. Disponível em <http://www.denverpost.com/2007/10/26/futures-fuel-right-under-our-feet/>, acessado em 27 de julho de 2016.

RAFFERTY, K. D. **Geothermal direct use engineering and design guidebook. Ch. 14: Absorption refrigeration.** Oregon Institute of Technology, Geo-Heat Center, Klamath Falls, 1989.

REDEMETS – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. **Produtos Climatológicos.** Disponível em <http://www.redemet.aer.mil.br/index.php?i=produtos&p=produtos-climatologicos>, acessado em 27 de julho de 2016.

REYNOLDS, W. C., PERKINS, H. C. **Engineering Thermodynamics.** New York: McGraw-Hill, 1977.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. **Adapting buildings and cities for climate change,** 2nd ed. Architectural Press – Elsevier, 2009.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS-REES, S. **Ecohouse,** 4th ed. Bookman Ed., 2013.

RORIZ, M. **Arquivos climáticos de municípios brasileiros.** São Carlos: ANTAC, 2012.

ROTH, P.; GOERGIEV, A.; BUSO, A.; BARRAZA, E. First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America. **Renewable Energy,** n. 29, p. 1947-1963, 2004.

SANER, D.; JURASKE, R.; KÜBERT, M.; BLUM, P.; HELLWEG, S.; BAYER, P. Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. **Renewable Sustainable Energy,** n. 14, p. 1798-1813, 2010.

SANTAELLA, T. História Revelada: Origens de um povo catarinense. **Diário Catarinense,** 13 de fevereiro de 2016. Disponível em http://www.clicrbs.com.br/sites/swf/dc_historiasreveladas/, acessado em 27 de julho de 2016.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. **Energy and Buildings,** n. 70, p. 441-454, 2014.

SATTLER, M. A. **Habitações de baixo custo mais sustentáveis: a casa Alvorada e o Centro Experimental de tecnologias habitacionais sustentáveis.** Coleção HABITARE v. 8. Porto Alegre: ANTAC, 2007. Disponível em http://www.habitare.org.br/publicacao_colecao9.aspx, acessado em 27 de julho de 2016.

SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C.; ZARRELLA, A.; SCARPA, M. Ground source heat pump performance in case of high humidity soil and yearly balanced heat transfer. **Energy Conversion Management,** n. 76, 2013.

SCHMITZ, P. I.; ROGGE, J. H. 107 ‘casas subterrâneas’ no início do povoamento Jê Meridional em Santa Catarina: Rincão dos Albinos. **R. Museu Arq. Etn.,** n. 21, p. 185-204, São Paulo, 2011.

SELF, S. J.; REDDY, B. V.; ROSEN, M. A. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. **Applied Energy,** n. 101, p. 314-348, 2013.

SENGE – Sindicato dos Engenheiros do Rio Grande do Sul. Aquecimento Global cria clima de extremos no RS. **SENGE – Notícias.** 5 de junho de 2016. Disponível em <http://>

www.sengers.org.br/site/noticias/2485/aquecimento-global-cria-clima-de-extremos-no-rs, acessado em 27 de julho de 2016.

SHAH, N.; WEI, M.; LETSCHERT, V.; PHADKE, A. **Benefits of Leapfrogging to Superefficiency and Low Global Warming Potential Refrigerants in Room Air Conditioning**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Outubro de 2015. Disponível em https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-1003671_0.pdf, acessado em 27 de julho de 2016.

SHORES, N. Governo quer ar-condicionado mais eficiente a partir de 2018. **Estadão – Economia & Negócios**. 16 de outubro de 2017. Disponível em <http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,governo-quer-ar-condicionado-mais-eficiente,70002046303>, acessado em 24 de outubro de 2017.

SILVA, D. R. B.; NETO, A. I. Dimensionamento de sistema geotérmico para climatização de residências em Curitiba. **XIII ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. 6 de outubro de 2010.

SILVEIRA, F. L. **O movimento anual do Sol em Porto Alegre**. UFRGS – Instituto de Física, Departamento de Astronomia, 2000. Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/dia.htm>, acessado em 20 de fevereiro de 2017.

SMITH, J. M.; Van NESS. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. 3rd ed. McGraw-Hill, 1975.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, n. 133, p. 1-13, 2016.

STUEBI, R. T. Geothermal Heat Pumps: Green for Your Wallet, Green for Our Planet. **Renewable Energies Conference**, Denver, November 29th, 2000.

TAKEDA, H.; VEERKAMP, P.; TOMIYAMA, T.; YOSHIKAWAM, H. Modeling design processes. **AI Magazine**, Winter, p. 37–48. 1990.

TAMVAKOLOGOS, M.; KARNEZI, S.; LEFAUCHEUR, J.; TSIRONNIS, I.; RODI, F. **Earth to air heat exchange through buried pipes**. Hybrid Energy Systems in Future Low Carbon Buildings – University of Strathclyde, Glasgow, 2010. Disponível em http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/09-10/Hybrid_systems/earthtoair.htm, acessado em 2 de fevereiro de 2017.

TAYLOR, M.; HITCHIN, R.; BERG, J. How Heat Pumps can help to address today's key Energy Policy Concerns. **IEA Heat Pump Programme Heat Pump Centre – Position paper**. April 2011. Disponível em <http://etkhpcorderapi.extweb.sp.se/api/file/384>, acessado em 27 de julho de 2016.

VAISHNAVI, V.; KUECHLER, W. Introduction to Design Science Research in Information and Communication Technology. **Introduction to Design Science Research in Technology**. 2007.

VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo com reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure. **VDI 4640 Blatt 2 - Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen**. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2001.

WEIMER, Günter (org.) *A arquitetura no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1987.

WU, R. Energy efficiency technologies – air source heat pump vs. ground source heat pump. **Journal of Sustainable Development**, v. 2, n. 2, 2009.

YANG, H.; CUI, P.; FANG, Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. **Applied Energy**, v. 87, n. 1, p. 16-27, 2010.

YERGIN, D. **O Petróleo**: Uma história mundial de conquistas, poder e dinheiro. São Paulo: Paz e Terra, 2010. Traduzido de: YERGIN, D. **The prize**: the epic quest for oil, Money, and power. 3rd ed., 2009.

YUEHONG, B.; TINGWEI, G.; LIANG, Z.; LINGEN, C. Solar and ground source heat-pump system. **Applied Energy**, v. 78, n. 2, p. 231-245, 2004.

APÊNDICE A – DETALHES CONSTRUTIVOS

Protótipo Casa Alvorada – PCA

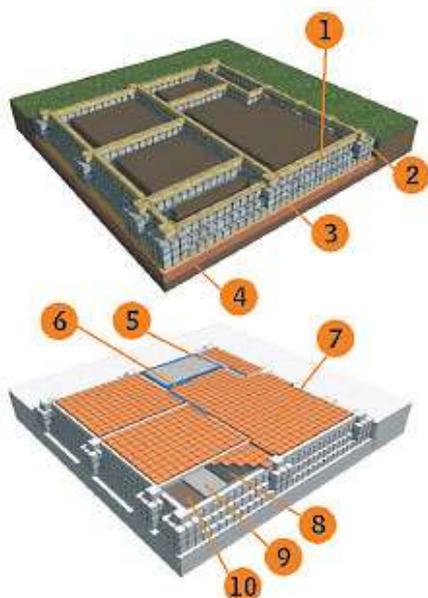
Localização: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil – Campus do Vale, UFRGS
(30°04'29" S, 51°07'34" W)

Construção: Envelope da edificação: Outubro de 2001 – Janeiro de 2003

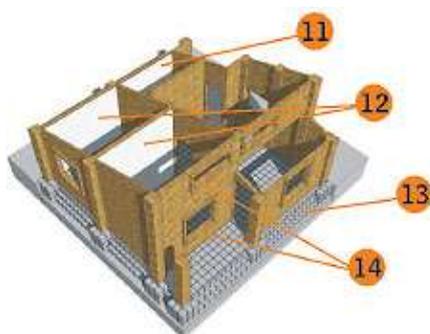
Subsistemas

Fonte: KUHN & SATTLER, 2008

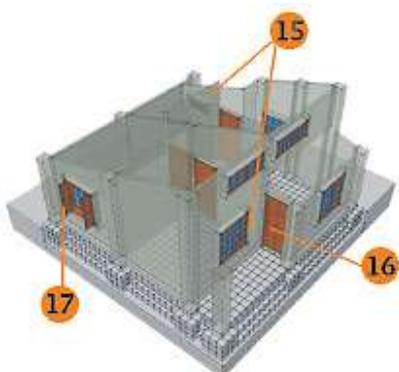
<i>Fundações</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 30 cm de solo-cimento compactado 2. 3 cm de camada de areia 3. Blocos de granito parcialmente reutilizados 4. 15 x 20 cm de vigas de concreto sob as paredes, impermeabilizadas com emulsão asfáltica elastomérica
<i>Pisos</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 3 cm de pedra britada 2. 5 cm de contrapiso 3. <i>Banheiro:</i> placas cerâmicas esmaltadas sobre argamassa adesiva pré-fabricada; <i>outros espaços:</i> placas cerâmicas corrugadas não-esmaltadas sobre argamassa de assentamento
<i>Paredes</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alvenaria de camada simples de 11 cm de tijolos vermelhos assentados com argamassa 2. <i>Fachadas externas sul e oeste:</i> revestimento em massa única; <i>banheiro:</i> placas cerâmicas esmaltadas sobre argamassa adesiva pré-fabricada
<i>Esquadrias</i>	Madeira de eucalipto. Janelas possuem uma área envidraçada média de 50%, consistindo em em uma camada única de 3 mm de vidro. Todas as as janelas são maxim-ar, exceto pela janela oeste, que possui venezianas.
<i>Telhado</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vigas de concreto 2. Forro de cedrinho com aberturas de ar nas extremidades inferior e superior 3. Caibros de pinus e cedrinho formando um colchão de ar 4. Chapas de offset de alumínio reaproveitadas 5. Ripas de cedrinho 6. Telhas romanas cerâmicas não-esmaltadas
<i>Pérgola</i>	Toras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> sobre blocos graníticos e base de concreto



- 1 Vigas de concreto 15 cm x 20 cm
- 2 Blocos de granito parcialmente reutilizados 22 cm x 22 cm x 22 cm
- 3 Camada de areia espessura = 3 cm
- 4 Camada de solo-cimento compactada espessura = 30 cm
- 5 Argamassa adesiva pré-fabricada
- 6 Placas cerâmicas esmaltadas
- 7 Placas cerâmicas corrugadas não esmaltadas
- 8 Argamassa de assentamento feita in loco
- 9 Contrapiso espessura = 5 cm
- 10 Lastro de pedra britada espessura = 3 cm



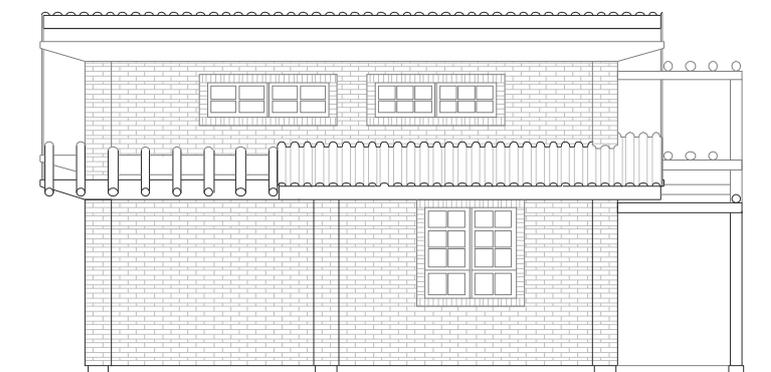
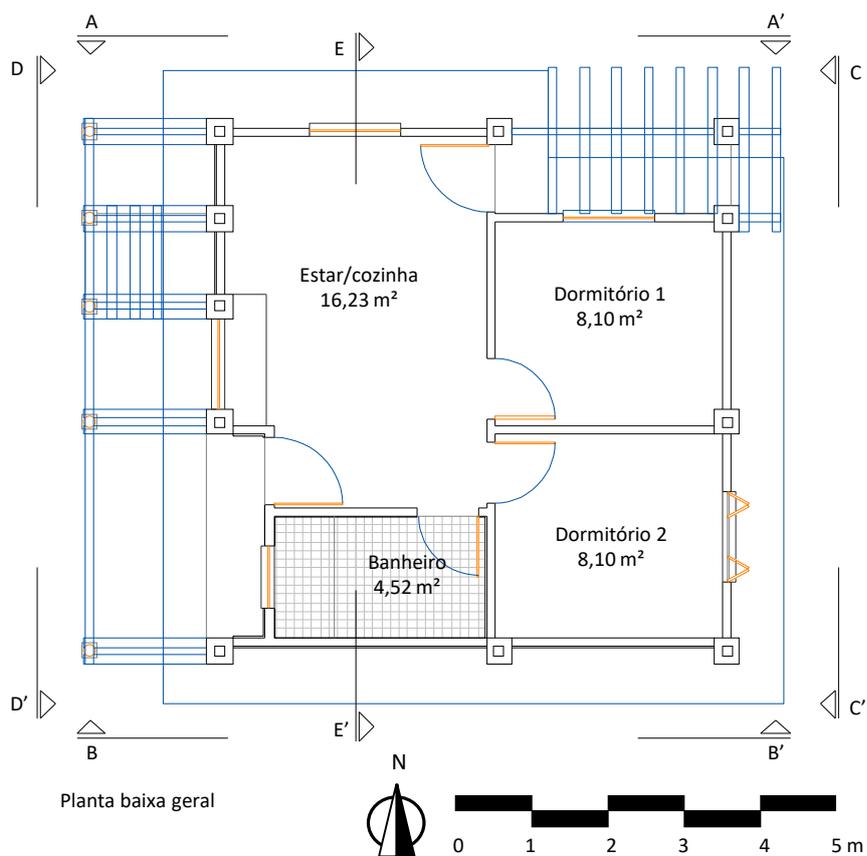
- 11 Placas cerâmicas esmaltadas assentadas com argamassa adesiva pré-fabricada e rejuntadas com argamassa feita in loco
- 12 Revestimento em massa única
- 13 Alvenarias em tijolos maciços de cerâmica vermelha assentados a chato (deitados) espessura da parede = 10 cm
- 14 Moldura em tijolos maciços



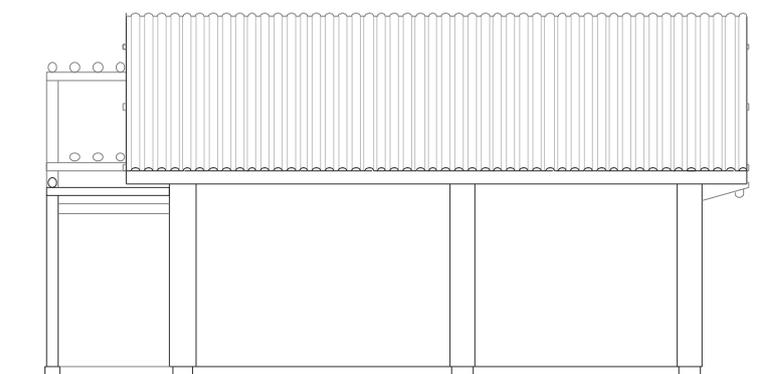
- 15 Janelas com barras de aço internas e vidros transparentes espessura = 3 mm
- 16 Esquadrias de madeira de eucalipto: cinco portas e sete janelas
Tratamento alternativo com dois tipos de mistura: óleo de linhaça diluído em essência de terebintina, produto biológico e água
- 17 Janela com venezianas e vidro transparente 3 mm



- 18 Chapas de off-set reaproveitadas de gráficas
- 19 Arremates laterais: tábuas de cedrino
- 20 Acabamentos em aço galvanizado
- 21 Telhas cerâmicas não esmaltadas (tipo romana)
- 22 Ripas: sarrafos de cedrino
- 23 Caibros: tábuas de pinus e cedrino justapostas parcialmente reutilizadas
- 24 Forro: ripas de cedrino
- 25 Vigas de concreto (dimensões 16 cm x 25 cm)



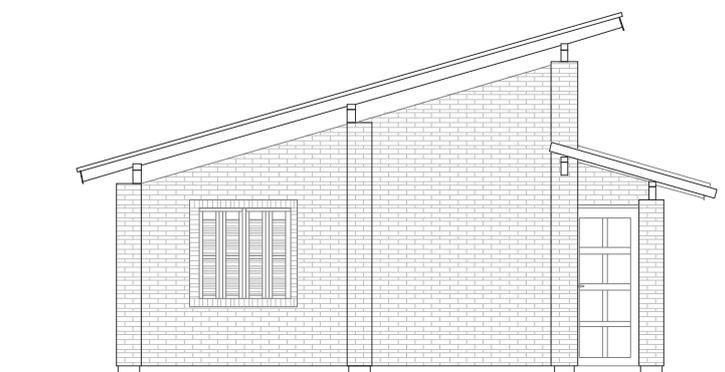
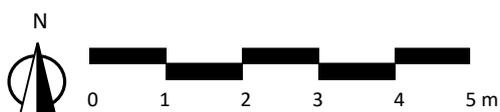
AA' – Fachada norte



BB' – Fachada sul



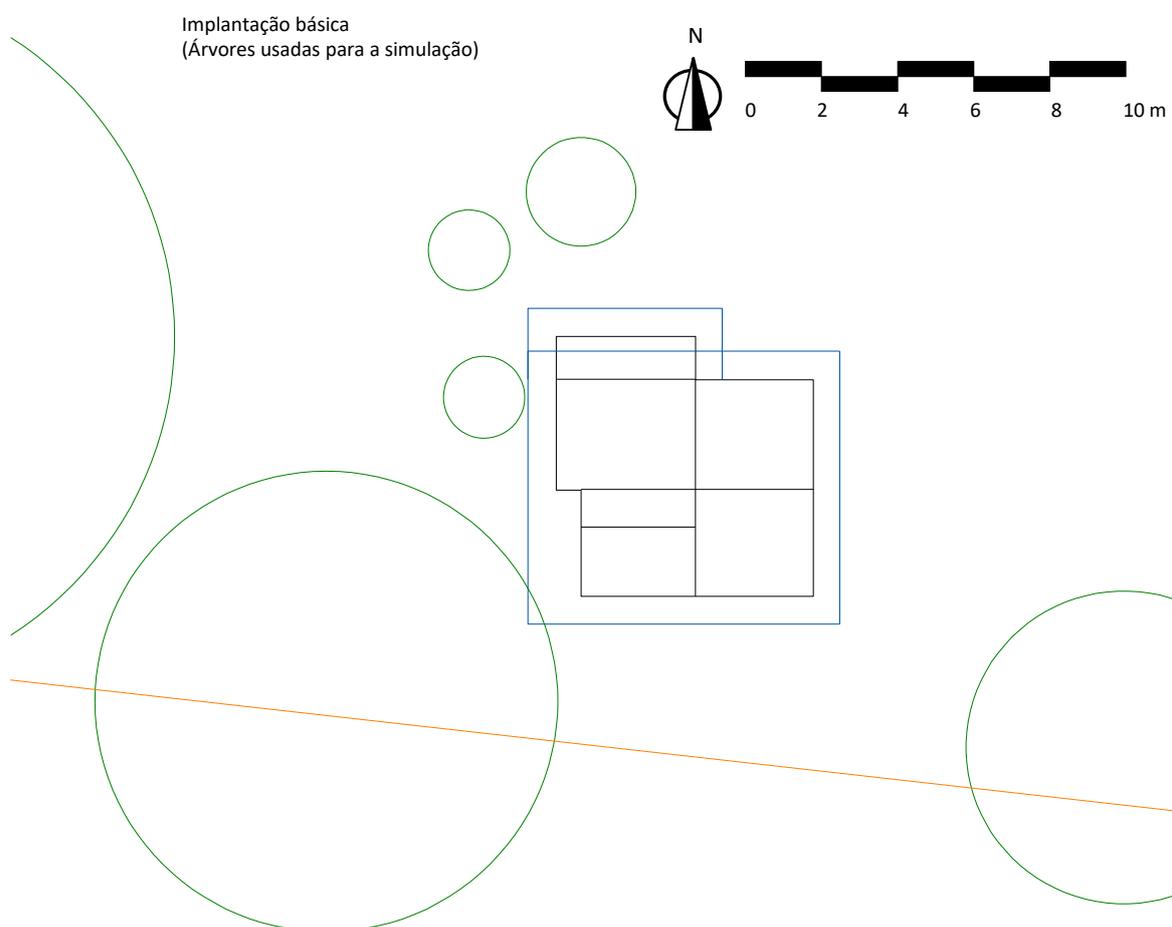
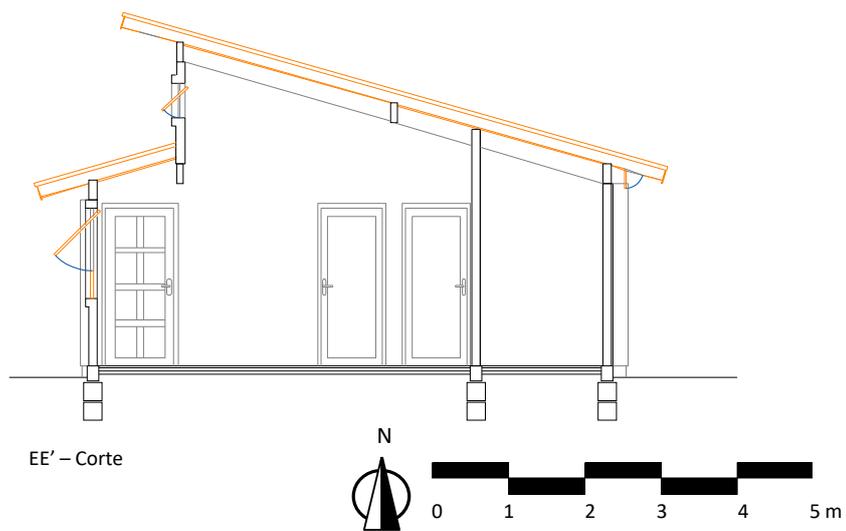
Vista do telhado



CC' - Fachada leste



DD' - Fachada oeste



APÊNDICE B – ARQUIVO CLIMÁTICO

REQUISITOS PARA ARQUIVOS CLIMÁTICOS E SELEÇÃO

As normas brasileiras estabelecem condições para arquivos climáticos utilizados em simulações para determinação da eficiência energética. São elas:

1. NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013, p. 22):

“Arquivos climáticos gerados por instituições de reconhecida capacitação técnica (universidades ou institutos de pesquisa) podem ser utilizados, desde que a fonte seja devidamente referenciada e os dados sejam de domínio público.”

2. RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, Portaria n.º 18 de 2012 (INMETRO, 2012, p.64):

“O arquivo climático utilizado deve possuir, no mínimo, as seguintes características:

- fornecer valores horários para todos os parâmetros relevantes requeridos pelo programa de simulação, tais como temperatura e umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar;
- os dados climáticos devem ser representativos da Zona Bioclimática onde o projeto sob avaliação será locado e, caso o local do projeto não possua arquivo climático, deve-se utilizar dados climáticos de uma região próxima que possua características climáticas semelhantes;
- devem ser utilizados arquivos climáticos disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (www.eere.energy.gov) ou os arquivos climáticos publicados no site www.procelinfo.com.br/etiquetagem_edificios, em formatos tais como TRY e TMY.”

No Brasil, os únicos tipos de arquivos que atendem a todas estas recomendações (especialmente quanto à recomendação pelo DOE) são os encontrados em *Weather Data Sources* (<https://energyplus.net/weather/sources>), sob os nomes “*Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Arquivo por Brasil*” e “*TRY Test Reference Year*”. Ambos estão disponíveis na página “Arquivos Climáticos” do LabEEE (<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>). Conforme explicado na Seção 5.1.1, os arquivos climáticos “INMET” foram preferidos por se basearem em um período de dados mais recente e em uma base de dados mais ampla, além de ainda serem atualizados pelo LabEEE. Além disso, conforme o *National Renewable Energy Laboratory*, arquivos gerados pelo método TMY, como o “INMET” são preferíveis aos pelo método TRY (DOE, 2017):

Users of energy simulation programs should avoid using single year, Test Reference Year-type (TRY) weather data. No single year can represent the typical long-term weather patterns. More comprehensive methods that attempt to produce a synthetic year to represent the temperature, solar radiation, and other variables within the period of record are more appropriate and will result in predicted energy consumption and energy costs that are closer to the longterm average. Both Typical Meteorological Year 2 (TMY2) and Weather Year for Energy Calculations 2 (WYEC2) use this type of method, are based on improved solar models, and more closely match the long-term average climatic conditions.

ARQUIVO CLIMÁTICO PORTO.ALEGRE.869880_INMET

Os arquivos “INMET” foram elaborados pelo Prof Maurício Roriz (DECiv – UFSCar) pelo método TMY, com base em 411 estações meteorológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010 (RORIZ, 2012). “O trabalho foi iniciado em abril de 2010, como parte das atividades do grupo constituído no âmbito da ANTAC para estudar a revisão do Zoneamento Bioclimático do Brasil (NBR 15220-3)” (RORIZ, 2012). Após o lançamento inicial, estes arquivos vêm passando por revisões para melhoria dos dados, como discutido em <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. O arquivo para Porto Alegre, utilizado para este trabalho, pode ser encontrado em http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos-climaticos/2015/BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET.zip.

O arquivo, em formato EPW (*EnergyPlus Weather File*), segue o formato de dados do 2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals – Ch. 14 - Climatic Design Information, com uma seção inicial caracterizando as condições de projeto, seguido pelos períodos típicos/extremos, pelas temperaturas do solo e pelos valores horários para as propriedades climáticas para todo o ano. O uso das condições de projeto pelo simulador para fins de dimensionamento é opcional, sendo que neste trabalho, os valores horários foram diretamente utilizados.

Condições de projeto arquivo BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET.epw

Lat: -30.03 Long: -51.23 Elev: 47 StdP: Time Zone: -3 Period: 2000-2010 INMET: 869880

Annual Heating and Humidification Design Conditions														
Coldest Month	Heating DB		Humidification DP/MCDB and HR						Coldest month WS/MCDB				MCWS/PCWD to 99.6% DB	
			99.6%			99%			0.4%		1%			
	99.6%	99%	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	WS	MCDB	WS	MCDB	MCWS	PCWD
7	3.9	5.8	1.1	4.1	8.2	2.9	4.7	8.5	10.1	11.8	8.8	13.6	1	300

Annual Cooling, Dehumidification, and Enthalpy Design Conditions

Hottest Month	Hottest Month DB Range	Cooling DB/MCWB						Evaporation WB/MCDB						MCWS/PCWD to 0.4% DB	
		0.4%		1%		2%		0.4%		1%		2%			
		DB	MCWB	DB	MCWB	DB	MCWB	WB	MCDB	WB	MCDB	WB	MCDB	MCWS	PCWD
1	9.7	34.7	24.6	33	24	31.8	23.6	26.4	31.3	25.6	30.4	25	29.4	3.5	300
Dehumidification DP/MCDB and HR									Enthalpy/MCDB						Hours 8 to 4 12.8/20 .6
0.4%			1%			2%			0.4%		1%		2%		
DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	
25.1	20.2	28.4	24.2	19.1	27.4	23.8	18.7	27	82.2	31.5	78.8	30.4	76.1	29.5	1057

Extreme Annual Design Conditions

Extreme Annual WS			Extreme Max DB	Extreme Annual DB				n-Year Return Period Values of Extreme DB							
				Mean		Standard deviation		n=5 years		n=10 years		n=20 years		n=50 years	
1%	2.5%	5%		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
9.4	8	7	29.8	1.1	37.5	1.9	1.3	-0.3	38.4	-1.4	39.1	-2.5	39.9	-3.9	40.8

CDDn	Cooling degree-days base n°C, °C-day	Lat	Latitude, °	Period	Years used to calculate the design conditions
CDHn	Cooling degree-hours base n°C, °C-hour	Long	Longitude, °	Sd	Standard deviation of daily average temperature, °C
DB	Dry bulb temperature, °C	MCDB	Mean coincident dry bulb temperature, °C	StdP	Standard pressure at station elevation, kPa
DP	Dew point temperature, °C	MCDBR	Mean coincident dry bulb temp. range, °C	taub	Clear sky optical depth for beam irradiance
Ebn,noon	Clear sky beam normal and diffuse horizontal irradiances at solar noon, W/m ²	MCDB	Mean coincident wet bulb temperature, °C	taud	Clear sky optical depth for diffuse irradiance
Edh,noon	Elevation, m	MCWB	Mean coincident wet bulb temperature, °C	Tavg	Average temperature, °C
Elev	Enthalpy, kJ/kg	MCWBR	Mean coincident wet bulb temp. range, °C	Time Zone	Hours ahead or behind UTC, and time zone code
Enth	Heating degree-days base n°C, °C-day	MCWS	Mean coincident wind speed, m/s	WB	Wet bulb temperature, °C
HDDn	Number of hours between 8 a.m. and 4 p.m. with DB between 12.8 and 20.6 °C	MDBR	Mean dry bulb temp. range, °C	WBAN	Weather Bureau Army Navy number
Hours 8/4 & 12.8/20.6	Humidity ratio, g of moisture per kg of dry air	PCWD	Prevailing coincident wind direction, °, 0=N, 90=E	WMO#	World Meteorological Organization number
HR				WS	Wind speed, m/s

Temperaturas do solo arquivo BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET.epw

Average Ground Temperatures, °C

Deepness, m	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.5	22.63	24.09	24.45	24.05	21.96	19.67	17.55	16.04	15.65	16.43	18.23	20.45
2.0	21.26	22.65	23.28	23.28	22.20	20.58	18.90	17.49	16.79	16.97	18.00	19.54
4.0	20.36	21.40	22.09	22.28	21.85	20.92	19.79	18.69	17.97	17.82	18.28	19.18

Dados climáticos arquivo BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET.epw

O arquivo original contém dados para diversas medições de temperatura, pressão, umidade, radiação e vento para as 8760 horas do ano. Valores médios diários (com mínimas e máximas de temperatura de bulbo seco) de propriedades diretamente usadas pelo EnergyPlus são mostrados a seguir.

Climactic Weather Data													
Month	Day	Dry bulb T			Mean dew point T	Mean R.H.	Mean press.	Mean horiz. IR rad.	Mean direct normal rad.	Mean diffuse horiz. Rad.	Mean wind direction	Mean wind speed	Opaque sky cover
		Min	Mean	Max									
1	1	20,1	24,4	28,8	19,6	75	100361	396	91	146	163	1,3	5
1	2	20,6	23,5	27,9	20,1	81	100418	392	59	95	113	1,4	5
1	3	20,1	23,4	27,5	18,2	74	100576	388	62	143	145	1,4	5
1	4	18,3	23,7	29,4	17,5	70	100499	389	174	122	156	1,5	5
1	5	19,9	23,3	27,9	15,7	63	100557	385	151	111	119	2,1	5
1	6	17,8	24,8	31,4	16,9	64	100630	395	183	118	151	1,7	5
1	7	20,2	27,1	35,6	18,1	63	100602	409	180	115	127	1,4	5
1	8	23,3	28,5	37,4	20,5	65	100510	420	157	119	182	1,9	5
1	9	24,0	28,1	35,3	22,7	74	100590	420	133	119	154	1,4	5
1	10	22,7	29,6	37,2	21,1	63	100659	427	174	115	218	1,9	5
1	11	25,1	29,1	36,0	21,7	66	100908	424	156	104	144	1,7	5
1	12	23,7	29,8	36,5	18,8	54	100798	424	177	115	187	1,7	5
1	13	25,4	27,4	30,6	20,9	67	101081	413	58	120	223	2,0	5
1	14	23,8	28,2	34,3	21,6	69	100930	419	107	123	111	1,4	5
1	15	23,6	29,8	36,1	20,5	59	100590	426	135	118	210	1,1	5
1	16	22,5	28,2	36,9	21,7	70	100651	419	121	123	192	1,5	5
1	17	18,1	20,3	22,5	17,7	85	101403	372	1	38	129	2,0	5
1	18	18,6	20,0	21,9	16,7	81	101206	369	1	59	109	1,7	5
1	19	19,1	22,4	26,4	19,8	85	100563	386	10	104	118	1,3	5
1	20	19,9	25,6	32,2	19,7	72	100505	403	165	117	189	1,2	5
1	21	22,0	25,4	31,7	21,0	78	100582	403	66	120	171	0,9	5
1	22	21,7	23,1	24,3	21,1	88	100790	390	3	98	146	1,2	5
1	23	19,6	21,2	22,7	19,1	88	100643	378	3	81	102	2,2	5
1	24	20,3	23,3	26,9	20,6	85	100408	391	8	116	139	1,1	5
1	25	22,0	24,8	30,2	20,7	78	100347	399	96	127	210	1,9	5
1	26	19,2	23,5	28,0	18,0	72	101070	389	143	129	166	2,0	5
1	27	18,6	23,9	29,7	18,0	70	101050	391	151	115	112	2,1	5
1	28	20,9	25,6	31,6	19,9	72	100815	403	67	143	133	1,4	5
1	29	22,1	26,7	32,5	19,8	67	100520	409	153	115	126	1,5	5
1	30	21,3	26,3	34,0	19,7	69	100455	406	146	108	203	1,5	5
1	31	20,6	23,9	27,2	18,2	71	100934	391	55	125	132	2,0	5
2	1	19,5	24,1	29,7	18,5	72	100893	393	71	134	120	2,2	5
2	2	21,2	25,7	31,5	19,9	71	100706	403	143	117	103	2,3	5
2	3	21,2	27,1	34,5	21,1	72	100478	412	127	110	171	1,1	5
2	4	23,5	28,2	34,2	21,3	68	100358	419	91	125	168	1,2	5
2	5	24,7	27,7	31,9	21,7	70	100168	416	31	121	277	1,3	5
2	6	21,8	24,7	27,9	18,3	67	100303	396	26	118	194	1,6	5
2	7	17,1	23,2	28,7	14,9	60	100424	384	152	115	130	1,5	5
2	8	19,2	22,9	27,5	13,8	58	100690	381	151	113	119	2,0	5
2	9	18,6	24,0	29,7	15,1	59	100943	388	151	119	124	1,9	5
2	10	19,3	23,3	27,9	16,2	65	101101	386	148	111	131	1,8	5
2	11	19,2	22,1	26,4	16,7	72	101007	380	56	116	118	2,2	5
2	12	19,9	24,4	29,8	18,9	72	100763	395	62	135	117	1,8	5
2	13	21,6	24,6	29,2	19,8	75	100865	397	91	124	142	1,8	5
2	14	19,8	24,6	30,2	17,2	66	100922	394	137	123	118	1,6	5
2	15	19,5	24,8	32,6	18,0	69	100769	396	142	97	108	1,9	5
2	16	21,8	23,3	24,5	20,8	85	100661	391	1	58	178	0,6	5
2	17	21,3	24,9	30,9	20,1	76	100657	399	91	99	158	1,2	5
2	18	20,4	25,0	29,6	19,9	75	100922	399	83	129	118	1,8	5
2	19	22,7	24,9	29,4	20,8	79	101099	400	35	126	106	2,8	5
2	20	22,0	23,7	27,4	20,2	81	100884	392	54	85	108	2,5	5
2	21	21,2	24,6	29,9	19,5	74	100254	397	57	114	146	1,5	5
2	22	20,7	23,8	28,3	19,5	78	99968	392	88	114	218	1,2	5
2	23	20,9	24,7	30,5	19,8	75	100068	397	45	121	116	1,4	5
2	24	19,1	23,3	29,6	19,1	78	99810	390	61	99	198	2,0	5
2	25	18,1	19,7	21,8	16,9	84	99950	368	1	56	286	2,7	5
2	26	19,4	21,7	25,2	18,6	83	100395	380	28	111	202	2,0	5
2	27	17,5	24,4	31,8	18,1	70	100631	394	132	101	126	1,3	5
2	28	19,7	25,7	31,6	18,6	68	100692	401	107	103	114	1,6	5
3	1	20,5	25,6	31,8	20,0	73	100610	403	131	102	129	1,3	5
3	2	23,7	25,2	29,6	22,0	82	100742	403	29	108	110	1,7	5
3	3	22,8	25,6	30,2	21,7	79	100583	405	29	115	184	1,4	5
3	4	21,8	24,5	27,4	19,6	74	100352	396	13	104	260	1,8	5
3	5	18,2	22,2	26,8	15,0	64	100545	378	99	105	255	2,3	5
3	6	18,2	22,6	28,1	16,1	68	100501	382	116	111	219	1,5	5
3	7	17,8	23,3	29,5	16,2	67	100416	386	128	104	139	1,2	5
3	8	18,5	25,6	32,6	16,8	62	100191	399	134	100	194	1,3	5
3	9	21,7	25,9	30,6	18,8	66	100197	403	67	109	199	1,3	5

Month	Day	Dry bulb T			Mean dew point T	Mean R.H.	Mean press.	Mean horiz. IR rad.	Mean direct normal rad.	Mean diffuse horiz. Rad.	Mean wind direction	Mean wind speed	Opaque sky cover
		Min	Mean	Max									
3	10	17,8	22,3	24,1	15,4	65	100893	379	53	118	141	2,5	5
3	11	15,1	21,2	27,1	13,5	63	101060	372	130	99	96	1,8	5
3	12	18,9	23,5	29,7	16,2	64	100879	387	100	88	117	1,4	5
3	13	19,6	25,1	31,4	17,8	66	100677	397	109	89	137	1,4	5
3	14	20,7	25,1	31,7	18,7	69	100751	399	120	94	104	1,7	5
3	15	20,1	26,0	34,1	18,9	68	100621	404	119	96	159	1,3	5
3	16	20,7	26,5	35,0	19,8	69	100590	408	117	95	158	1,1	5
3	17	20,8	28,3	36,3	19,0	59	100445	417	114	92	190	1,2	5
3	18	23,6	25,7	28,7	21,1	75	100710	404	52	91	148	1,9	5
3	19	21,8	23,7	25,5	22,0	90	100623	395	1	53	138	1,0	5
3	20	21,4	23,5	26,8	21,3	87	100723	393	26	105	185	1,2	5
3	21	20,0	23,0	27,5	18,0	74	101222	386	111	85	105	2,1	5
3	22	21,3	24,6	28,4	20,8	79	101048	398	33	89	110	2,3	5
3	23	23,8	24,5	25,4	22,3	87	100406	399	4	59	131	1,2	5
3	24	22,7	25,4	30,4	21,2	78	100303	403	87	94	229	2,2	5
3	25	19,5	21,7	23,9	18,3	80	101124	380	3	72	129	1,8	5
3	26	17,4	20,5	24,2	13,1	63	101557	368	83	93	129	2,3	5
3	27	15,9	21,6	28,1	14,5	65	101216	375	108	78	100	1,1	5
3	28	20,1	22,5	27,1	18,3	77	100786	384	63	86	151	1,4	5
3	29	16,5	18,8	21,1	14,3	75	100761	361	15	90	142	1,9	5
3	30	14,0	18,8	24,2	12,3	67	101115	358	103	87	142	0,9	5
3	31	14,7	19,3	25,0	14,2	72	101178	363	60	97	96	1,1	5
4	1	20,1	22,4	27,1	18,2	77	100900	384	64	82	144	1,5	5
4	2	18,9	22,6	27,5	18,2	77	101402	385	79	90	102	1,8	5
4	3	18,9	23,7	30,3	17,5	69	101104	390	77	81	97	1,0	5
4	4	19,8	23,8	29,8	17,1	67	101035	390	74	83	104	1,0	5
4	5	18,7	24,1	30,3	17,6	68	100832	392	75	82	165	1,1	5
4	6	21,4	22,9	24,9	19,3	79	100923	387	5	75	213	1,0	5
4	7	20,0	22,9	27,9	19,4	81	100880	387	37	88	143	1,0	5
4	8	20,6	23,0	27,7	19,3	79	100771	388	53	84	149	1,2	5
4	9	18,9	21,7	24,3	18,4	82	100467	380	12	89	136	0,8	5
4	10	19,9	21,5	23,8	18,5	83	100204	379	33	92	215	0,7	5
4	11	18,3	20,8	24,6	17,6	82	100244	375	28	60	277	1,6	5
4	12	17,4	21,4	26,4	15,9	72	100495	376	91	73	244	1,7	5
4	13	18,1	20,9	25,3	16,6	77	100714	374	47	75	170	0,9	5
4	14	17,5	21,6	26,6	16,8	74	100580	378	37	96	210	1,2	5
4	15	17,5	19,2	20,5	16,2	83	101108	365	2	52	192	1,5	5
4	16	15,4	20,9	26,4	15,4	72	100931	372	90	73	223	2,0	5
4	17	13,8	19,1	25,3	13,8	72	101195	362	48	73	169	0,7	5
4	18	13,2	17,5	21,8	12,2	71	101683	352	44	82	168	1,1	5
4	19	14,9	19,2	24,7	13,2	69	101513	361	61	79	101	1,4	5
4	20	14,7	20,3	26,3	13,0	64	101157	367	54	80	83	0,9	5
4	21	14,0	17,8	20,3	13,6	76	100610	355	5	46	175	1,0	5
4	22	11,4	16,4	22,0	9,3	65	100833	343	81	64	255	1,4	5
4	23	13,4	18,2	24,6	8,7	54	100860	351	77	65	233	1,6	5
4	24	11,3	18,0	26,2	9,9	61	101101	352	78	64	170	0,6	5
4	25	13,2	18,9	26,1	13,4	70	100873	361	32	80	216	0,8	5
4	26	16,1	18,5	22,1	15,3	82	101160	360	7	64	235	1,1	5
4	27	13,5	18,2	23,9	14,0	77	101216	358	69	64	172	0,7	5
4	28	13,3	18,5	24,3	13,7	74	101151	359	64	64	129	1,0	5
4	29	13,7	19,7	26,4	14,8	74	100817	366	67	60	161	0,9	5
4	30	14,2	18,0	20,6	14,0	77	100972	356	14	55	152	1,1	5
5	1	9,7	13,7	17,2	6,4	61	101225	328	50	62	282	2,7	5
5	2	12,5	13,7	15,3	8,9	72	101248	330	0	32	282	3,3	5
5	3	12,6	15,9	20,3	12,2	79	101334	344	11	52	235	2,4	5
5	4	11,8	15,5	20,0	10,9	74	101368	341	46	66	238	1,6	5
5	5	13,1	17,4	20,6	13,3	77	101071	353	14	54	171	1,2	5
5	6	9,7	14,6	18,9	10,5	76	101452	336	10	62	195	1,8	5
5	7	15,2	17,8	21,9	14,2	79	101639	356	39	57	124	1,8	5
5	8	15,1	16,3	19,4	13,7	84	101733	348	4	60	122	1,3	5
5	9	14,2	15,9	17,7	13,9	88	101796	346	3	49	124	1,0	5
5	10	15,6	17,5	21,0	14,5	82	101637	354	45	60	149	1,9	5
5	11	14,8	16,6	19,5	13,5	82	101606	349	12	58	179	1,3	5
5	12	12,9	15,7	19,3	12,8	83	101648	344	6	70	187	1,1	5
5	13	15,1	16,3	19,4	13,7	84	101733	348	4	59	122	1,3	5
5	14	12,9	16,3	20,5	12,9	80	101706	347	20	70	131	1,5	5
5	15	10,3	16,6	22,6	12,5	77	101664	348	51	51	141	1,4	5
5	16	12,8	17,3	23,3	12,1	72	101546	351	53	58	111	1,0	5
5	17	12,0	17,2	23,8	12,0	72	101456	351	54	51	175	0,8	5
5	18	12,5	18,3	24,9	12,4	69	101147	356	45	54	189	1,1	5
5	19	14,5	16,3	18,2	13,5	83	100936	348	4	59	136	1,2	5

Month	Day	Dry bulb T			Mean dew point T	Mean R.H.	Mean press.	Mean horiz. IR rad.	Mean direct normal rad.	Mean diffuse horiz. Rad.	Mean wind direction	Mean wind speed	Opaque sky cover
		Min	Mean	Max									
5	20	13,1	14,6	18,5	12,5	87	100948	338	1	36	192	1,3	5
5	21	9,5	14,1	17,7	10,7	80	101877	334	45	53	195	1,1	5
5	22	10,9	13,7	15,4	9,7	77	102035	331	47	57	124	1,3	5
5	23	6,3	12,4	17,7	8,6	77	102206	324	45	52	89	0,7	5
5	24	5,8	12,2	17,7	9,0	80	102202	324	18	65	135	1,3	5
5	25	13,1	15,8	20,3	12,4	80	101769	344	47	52	112	1,4	5
5	26	10,1	16,0	22,4	12,1	78	101284	345	44	51	91	0,8	5
5	27	14,5	19,3	24,2	15,2	77	100905	364	23	59	269	1,0	5
5	28	12,1	15,9	19,0	11,9	77	101367	344	36	55	136	1,6	5
5	29	10,1	13,7	17,0	10,7	82	101286	332	12	53	114	1,6	5
5	30	14,9	16,6	18,6	15,3	92	100922	351	0	19	130	0,8	5
5	31	13,4	15,9	18,3	14,4	90	101225	347	14	50	137	1,3	5
6	1	12,6	14,6	18,4	12,3	86	101846	338	23	61	149	1,2	5
6	2	12,1	15,8	20,1	12,9	82	101688	345	43	45	98	2,3	5
6	3	15,7	17,8	19,5	12,5	71	101127	353	6	61	87	1,0	5
6	4	14,4	17,1	19,0	13,8	81	100888	352	2	33	225	1,6	5
6	5	10,2	13,2	17,6	9,9	80	101393	329	45	49	223	1,0	5
6	6	9,8	15,4	21,9	11,5	77	101243	342	36	50	92	0,9	5
6	7	14,1	20,0	26,7	16,0	78	101158	369	29	53	113	0,6	5
6	8	17,3	22,6	30,6	16,0	68	101034	382	40	47	124	0,8	5
6	9	17,0	21,3	27,5	13,6	62	100803	373	41	46	164	1,4	5
6	10	13,1	15,4	17,5	13,2	86	101121	343	0	14	163	1,5	5
6	11	10,3	12,2	14,9	9,1	81	101753	324	13	56	183	1,3	5
6	12	6,8	10,9	15,8	7,5	79	101894	316	41	47	120	1,0	5
6	13	7,8	14,8	23,4	11,1	79	101482	339	40	47	163	0,6	5
6	14	13,5	17,3	20,4	14,7	85	101242	354	6	50	134	0,4	5
6	15	13,8	15,9	18,1	14,1	89	101375	346	0	12	159	1,0	5
6	16	10,4	13,1	16,6	10,2	82	101930	329	37	45	128	1,2	5
6	17	9,9	13,3	16,7	9,4	77	101837	329	13	55	112	2,0	5
6	18	13,4	16,1	20,3	12,6	79	101550	346	14	51	104	1,1	5
6	19	13,9	19,2	26,7	14,5	75	101030	363	38	47	158	0,7	5
6	20	17,6	20,8	26,7	14,1	66	100874	370	14	53	154	1,0	5
6	21	11,4	14,4	18,0	12,3	87	101283	337	0	13	170	1,4	5
6	22	10,9	14,7	19,5	12,6	87	101625	339	35	53	110	1,1	5
6	23	10,9	15,5	18,8	12,5	82	101710	343	23	54	107	1,3	5
6	24	13,0	18,6	25,4	15,2	81	101168	361	22	58	98	0,6	5
6	25	15,0	18,9	28,1	14,5	76	100457	362	28	47	194	1,9	5
6	26	11,5	12,7	15,6	9,0	78	100623	325	3	45	280	4,2	5
6	27	8,6	11,8	16,0	8,6	81	101923	321	22	57	204	1,6	5
6	28	6,5	10,9	15,8	8,0	82	102417	317	21	57	135	0,9	5
6	29	11,1	13,9	18,5	10,0	77	102090	332	30	46	112	1,3	5
6	30	8,8	14,3	19,8	11,1	81	101906	335	39	45	132	0,9	5
7	1	11,4	15,2	20,3	12,5	84	101757	341	21	52	163	0,8	5
7	2	14,5	15,7	17,8	13,2	85	101924	344	1	43	178	0,5	5
7	3	12,5	15,7	20,9	13,2	85	101769	344	29	48	156	0,5	5
7	4	13,2	16,0	20,3	13,7	86	101578	346	32	49	248	1,0	5
7	5	12,9	16,8	21,7	14,3	85	101599	351	38	48	197	0,7	5
7	6	14,3	17,5	22,8	14,7	83	101555	355	39	47	144	0,7	5
7	7	12,1	18,2	25,4	13,9	76	101053	358	40	48	146	0,9	5
7	8	15,3	21,5	27,3	15,2	68	100325	376	11	59	150	0,7	5
7	9	11,2	16,3	20,1	11,3	72	100707	345	17	58	260	1,9	5
7	10	8,1	12,8	18,0	8,3	74	101411	326	44	50	129	0,9	5
7	11	9,6	17,2	24,5	12,7	75	101125	352	40	45	105	1,2	5
7	12	17,8	23,5	31,2	15,4	62	100859	386	41	49	149	1,3	5
7	13	18,4	23,7	31,0	14,5	58	101131	386	39	50	237	1,3	5
7	14	14,5	16,0	17,4	13,6	86	101880	346	0	8	146	2,1	5
7	15	14,4	15,4	16,2	14,0	91	102306	344	0	21	118	2,4	5
7	16	16,0	17,7	19,5	15,8	88	101939	357	1	36	112	1,6	5
7	17	15,8	18,6	22,9	16,7	88	101751	363	32	54	205	0,7	5
7	18	15,7	18,6	23,5	16,2	86	101327	362	39	48	164	0,6	5
7	19	13,3	17,4	23,0	14,3	82	101124	354	38	48	216	1,2	5
7	20	10,7	16,8	24,4	13,1	78	101070	350	43	51	179	0,6	5
7	21	14,1	19,6	27,1	14,3	72	100845	365	43	52	194	0,9	5
7	22	15,6	22,0	29,5	12,9	58	100548	376	45	52	189	1,4	5
7	23	15,9	17,5	20,7	12,3	71	100881	352	5	49	140	1,7	5
7	24	16,3	17,7	19,6	15,5	86	100992	357	1	32	117	2,1	5
7	25	17,9	18,7	19,6	17,1	90	100698	363	0	17	190	1,0	5
7	26	17,5	18,8	20,5	17,3	90	100562	364	0	25	226	1,4	5
7	27	16,6	18,1	20,4	16,4	90	100390	359	1	16	145	1,7	5
7	28	12,9	17,4	19,8	12,0	71	100777	351	20	66	219	2,0	5
7	29	8,0	10,7	13,2	3,5	61	101536	311	27	44	253	3,2	5

Month	Day	Dry bulb T			Mean dew point T	Mean R.H.	Mean press.	Mean horiz. IR rad.	Mean direct normal rad.	Mean diffuse horiz. Rad.	Mean wind direction	Mean wind speed	Opaque sky cover
		Min	Mean	Max									
7	30	4,7	14,8	19,6	12,3	85	101117	340	0	17	231	1,2	5
7	31	6,0	16,5	20,5	14,5	87	100946	350	0	25	234	1,2	5
8	1	3,6	8,3	13,3	4,3	77	102323	301	13	72	124	1,0	5
8	2	3,3	8,9	14,4	5,1	78	102169	305	36	63	116	0,9	5
8	3	8,0	12,6	18,1	7,7	73	101758	324	21	68	128	1,6	5
8	4	4,7	14,8	19,6	12,3	85	101117	340	0	18	231	1,2	5
8	5	9,7	15,6	19,8	12,3	81	101096	343	10	71	214	1,4	5
8	6	12,4	16,1	20,2	11,5	76	101115	344	61	57	197	1,6	5
8	7	15,5	18,6	22,0	13,5	72	100768	359	47	62	143	1,3	5
8	8	18,3	21,2	24,3	15,2	69	100386	373	37	61	88	0,9	5
8	9	15,0	23,8	32,2	13,4	56	100163	385	36	67	158	1,8	5
8	10	12,4	16,1	20,2	11,5	76	101120	344	62	58	197	1,6	5
8	11	12,8	16,4	19,5	13,7	84	100765	348	2	34	115	1,8	5
8	12	16,2	20,5	26,5	17,3	82	100557	373	24	73	121	1,1	5
8	13	16,2	18,9	22,3	17,2	89	100533	365	11	42	108	1,4	5
8	14	16,9	20,1	24,9	17,2	84	100182	370	0	22	142	0,7	5
8	15	13,9	15,7	20,9	12,8	82	101024	344	1	43	134	1,8	5
8	16	10,4	11,9	13,8	9,9	87	101396	323	1	26	147	1,9	5
8	17	10,9	13,3	15,5	10,4	82	101702	330	4	66	144	2,0	5
8	18	9,5	11,9	13,3	10,2	89	101485	323	2	45	181	1,6	5
8	19	7,6	11,6	15,7	6,8	75	101280	318	63	73	200	1,8	5
8	20	7,3	11,0	16,4	5,2	69	101375	314	51	69	223	2,1	5
8	21	9,5	11,9	13,3	10,2	89	101485	323	2	45	181	1,6	5
8	22	2,8	9,5	17,0	3,0	67	101649	306	72	73	215	1,0	5
8	23	7,0	13,9	21,6	6,2	63	101411	329	70	70	237	0,9	5
8	24	8,8	16,9	27,0	8,7	63	101323	345	65	72	160	0,6	5
8	25	11,4	20,8	30,6	10,4	55	100809	367	69	72	171	0,6	5
8	26	16,4	18,3	21,0	12,7	71	100073	356	0	23	177	0,8	5
8	27	11,3	15,1	17,7	10,8	75	100671	339	3	39	241	2,2	5
8	28	8,8	16,9	27,0	8,7	63	101323	345	65	72	160	0,6	5
8	29	11,4	20,8	30,6	10,4	55	100809	367	69	72	171	0,6	5
8	30	8,4	14,4	20,2	8,6	69	101652	334	79	72	105	1,7	5
8	31	12,3	17,1	23,2	12,7	76	101000	351	67	60	101	1,0	5
9	1	12,9	15,9	20,2	13,6	86	100495	346	51	76	139	1,8	5
9	2	10,5	14,1	16,6	10,9	81	99993	334	5	64	245	4,0	5
9	3	8,1	14,4	21,1	6,8	63	101690	331	102	76	131	1,1	5
9	4	11,6	17,6	24,3	12,1	72	101109	352	43	84	104	0,8	5
9	5	3,9	8,5	14,0	2,4	67	102398	300	88	83	221	1,8	5
9	6	4,6	10,2	16,0	5,3	73	102305	311	99	76	146	1,4	5
9	7	8,1	14,4	21,1	6,8	63	101690	331	102	76	131	1,1	5
9	8	11,6	17,6	24,3	12,1	72	101109	352	43	84	104	0,8	5
9	9	12,8	17,2	21,8	13,9	81	100932	352	16	70	219	1,7	5
9	10	9,8	17,3	25,1	11,9	72	101107	351	79	88	87	0,8	5
9	11	15,8	24,4	32,0	17,1	65	100696	393	73	84	228	1,4	5
9	12	13,7	17,9	22,3	14,8	82	101005	357	29	94	130	2,2	5
9	13	13,4	14,7	16,2	12,9	89	100871	339	0	19	129	2,3	5
9	14	14,9	17,2	20,9	15,2	88	100433	354	18	90	184	1,1	5
9	15	12,3	15,4	16,9	14,3	93	100887	344	0	22	128	1,2	5
9	16	9,0	14,2	19,5	7,1	66	101708	331	118	85	99	1,5	5
9	17	11,6	16,4	22,8	11,2	73	101442	346	78	93	112	1,7	5
9	18	11,8	17,7	25,2	13,3	77	101346	354	111	88	142	1,0	5
9	19	12,1	18,6	26,0	13,9	76	100999	359	113	80	139	1,7	5
9	20	16,3	17,3	19,2	15,3	88	100386	354	0	24	193	1,3	5
9	21	15,1	16,8	19,9	14,5	86	100864	351	10	95	188	1,3	5
9	22	14,6	19,5	27,0	14,8	76	100759	365	106	77	92	1,3	5
9	23	14,5	17,8	20,9	12,7	73	100808	354	11	83	176	1,1	5
9	24	9,9	13,3	17,1	6,5	64	101634	326	127	89	167	1,8	5
9	25	7,8	13,7	20,6	7,3	67	101854	329	121	85	122	1,4	5
9	26	10,7	16,2	22,2	7,9	60	101730	341	135	87	110	2,8	5
9	27	11,5	19,3	26,8	11,1	61	101351	360	116	86	94	0,7	5
9	28	15,6	18,3	20,9	14,3	77	101363	358	3	75	196	1,5	5
9	29	13,5	16,5	20,8	10,4	68	101678	345	65	111	133	2,4	5
9	30	11,9	17,5	24,6	10,8	66	101500	350	138	87	112	2,1	5
10	1	15,1	19,2	24,1	14,1	73	101128	362	13	113	101	0,8	5
10	2	16,0	20,1	25,4	15,7	77	100900	369	75	113	110	1,4	5
10	3	15,2	21,0	27,9	16,0	75	100769	374	116	91	159	1,3	5
10	4	18,4	22,4	29,2	17,4	75	100498	383	87	100	110	1,6	5
10	5	15,7	19,2	22,2	16,1	82	100695	365	1	55	181	1,8	5
10	6	11,9	16,7	21,4	10,9	69	101317	347	30	123	120	1,9	5
10	7	14,1	16,5	19,5	12,5	77	101292	348	4	82	119	1,6	5
10	8	12,7	17,3	22,8	10,8	67	101412	350	109	109	106	1,9	5

Month	Day	Dry bulb T			Mean dew point T	Mean R.H.	Mean press.	Mean horiz. IR rad.	Mean direct normal rad.	Mean diffuse horiz. Rad.	Mean wind direction	Mean wind speed	Opaque sky cover
		Min	Mean	Max									
10	9	12,8	20,4	29,3	14,3	70	101175	370	147	87	109	1,8	5
10	10	17,3	24,9	34,4	18,0	69	100828	397	113	102	191	1,3	5
10	11	17,4	20,3	24,4	17,3	83	100859	371	15	110	196	2,0	5
10	12	15,8	19,8	23,9	16,3	80	100784	368	23	120	108	2,2	5
10	13	18,8	21,8	27,3	17,9	79	100661	380	125	100	111	2,7	5
10	14	19,8	23,9	30,4	18,2	71	100470	392	148	93	100	2,2	5
10	15	17,1	20,5	23,6	18,1	86	100766	373	3	70	162	1,5	5
10	16	14,6	18,4	22,1	12,9	71	101413	357	72	119	144	2,4	5
10	17	12,4	17,6	22,8	11,2	67	101314	351	165	94	116	2,8	5
10	18	14,9	17,9	21,2	12,7	72	101072	354	13	117	115	2,7	5
10	19	15,8	17,4	20,0	13,7	79	101194	353	3	68	119	2,6	5
10	20	13,3	17,3	20,5	10,4	64	101565	349	40	129	116	2,7	5
10	21	11,7	18,1	25,4	10,8	64	101426	354	171	94	144	1,8	5
10	22	12,9	19,7	27,0	13,0	69	101243	364	163	98	154	1,4	5
10	23	15,1	21,9	29,3	14,3	65	101207	377	162	96	111	1,3	5
10	24	16,9	23,5	31,1	14,8	61	101022	386	161	94	133	1,4	5
10	25	18,7	25,8	32,8	15,4	55	100774	398	145	102	224	1,3	5
10	26	16,0	20,6	23,9	14,9	70	100848	370	20	69	167	2,1	5
10	27	14,6	18,8	23,6	10,9	62	100817	357	137	107	112	2,0	5
10	28	16,1	21,2	27,5	14,2	66	100764	373	128	109	110	3,0	5
10	29	17,7	23,4	30,9	15,9	66	100416	386	94	131	121	2,1	5
10	30	19,6	23,6	29,0	18,8	75	100258	391	139	107	149	1,6	5
10	31	19,9	22,3	25,6	18,7	80	100359	383	9	117	136	1,8	5
11	1	19,2	21,1	24,1	18,5	85	100425	377	2	72	153	1,7	5
11	2	18,0	21,1	25,5	16,0	73	100665	374	56	110	162	2,0	5
11	3	16,3	20,8	26,2	13,9	67	100926	370	173	97	134	2,0	5
11	4	16,4	20,0	23,1	13,8	68	101082	366	26	138	110	3,3	5
11	5	18,2	22,0	27,8	17,2	75	100447	380	106	122	95	2,8	5
11	6	17,4	21,2	25,0	18,5	85	99974	377	3	67	170	1,6	5
11	7	14,1	18,0	21,2	9,7	60	101191	351	186	100	167	2,5	5
11	8	11,9	15,8	21,0	7,8	61	101325	339	200	98	199	1,5	5
11	9	10,2	17,1	23,3	7,6	57	101200	345	196	101	200	1,5	5
11	10	12,3	19,6	26,8	9,8	57	101165	360	197	98	226	1,3	5
11	11	14,9	18,1	21,3	11,9	68	101479	354	24	119	121	2,0	5
11	12	15,0	19,9	25,8	12,2	63	101652	364	189	97	98	2,7	5
11	13	15,9	21,9	28,2	11,9	55	101626	374	198	96	91	1,8	5
11	14	17,6	23,6	31,5	13,5	56	101130	384	192	101	102	1,4	5
11	15	18,4	25,9	33,2	15,5	55	100566	399	182	101	111	1,2	5
11	16	19,8	26,9	35,9	16,8	57	100436	406	98	134	161	1,5	5
11	17	19,2	20,1	21,9	18,6	90	100601	372	1	41	127	2,0	5
11	18	16,4	18,3	19,9	16,4	88	101044	361	1	64	120	2,8	5
11	19	15,0	16,0	17,0	14,6	92	101260	347	2	77	126	3,2	5
11	20	14,9	18,4	23,0	14,2	77	101223	359	87	128	112	2,8	5
11	21	15,0	21,7	28,5	14,9	67	100878	376	197	99	102	1,5	5
11	22	18,3	23,8	30,9	15,8	64	100726	388	177	106	169	1,4	5
11	23	15,6	22,4	29,7	14,9	64	100758	380	196	102	107	1,8	5
11	24	19,4	24,5	32,8	19,0	74	100560	396	113	119	175	1,3	5
11	25	20,3	21,6	23,9	19,9	90	100583	381	2	85	146	0,4	5
11	26	18,0	21,2	23,7	17,5	80	100902	376	28	119	128	2,7	5
11	27	17,5	19,8	22,9	14,9	74	100818	366	19	145	115	3,7	5
11	28	17,6	20,9	25,8	16,6	77	100407	374	77	125	111	2,5	5
11	29	18,3	19,8	21,5	16,9	83	100788	369	6	101	118	2,6	5
11	30	17,5	21,1	25,3	15,6	71	101110	374	111	137	110	3,2	5
12	1	16,7	23,1	30,1	15,4	64	100917	384	200	106	99	2,0	5
12	2	19,1	25,8	32,7	15,4	55	100680	398	191	103	98	1,0	5
12	3	21,8	27,8	34,6	17,8	57	100506	412	155	115	206	1,1	5
12	4	18,8	23,6	27,3	18,1	72	100749	390	170	105	132	2,2	5
12	5	18,1	21,6	25,2	16,3	72	100922	377	51	134	114	2,5	5
12	6	17,4	21,1	24,9	17,5	80	100695	376	34	113	127	2,5	5
12	7	16,9	21,1	26,1	13,3	63	100746	371	166	114	117	2,3	5
12	8	17,6	21,9	26,7	14,9	65	100527	377	155	121	110	2,9	5
12	9	18,2	23,2	29,1	17,9	73	100489	388	37	145	128	1,3	5
12	10	20,1	23,5	28,8	19,1	77	100778	390	64	124	125	1,7	5
12	11	20,9	24,7	30,3	18,8	71	100915	397	187	108	111	2,6	5
12	12	21,4	25,9	33,0	17,9	63	100783	402	184	111	103	1,9	5
12	13	20,8	25,1	30,4	18,2	67	100638	398	63	152	141	1,4	5
12	14	21,6	28,3	36,1	19,8	62	100396	418	172	116	164	1,6	5
12	15	21,4	26,8	34,9	20,8	71	100555	411	185	103	132	1,8	5
12	16	22,2	26,5	32,8	21,1	73	100578	409	190	113	116	2,1	5
12	17	22,2	28,9	37,2	21,7	67	100304	423	106	134	165	1,2	5
12	18	22,5	24,9	28,5	22,1	84	100385	401	15	108	118	1,5	5

Month	Day	Dry bulb T			Mean dew point T	Mean R.H.	Mean press.	Mean horiz. IR rad.	Mean direct normal rad.	Mean diffuse horiz. Rad.	Mean wind direction	Mean wind speed	Opaque sky cover
		Min	Mean	Max									
12	19	23,1	27,4	34,1	21,6	72	100209	415	82	137	239	0,7	5
12	20	22,6	26,0	31,5	20,9	74	99870	406	29	119	175	1,6	5
12	21	19,5	23,1	27,5	17,9	73	100598	387	68	142	170	1,9	5
12	22	18,8	24,4	31,1	17,4	67	100829	393	196	113	103	2,0	5
12	23	20,6	25,4	33,6	18,4	67	100599	400	159	120	133	1,6	5
12	24	20,2	24,4	27,3	20,3	79	100202	397	30	152	212	1,9	5
12	25	20,2	23,4	27,5	18,9	76	100337	390	23	132	160	1,6	5
12	26	17,2	22,9	27,8	15,7	66	100729	383	189	108	171	1,2	5
12	27	17,2	23,5	29,3	14,6	60	100925	385	193	116	151	1,3	5
12	28	17,9	24,8	31,3	16,4	63	101179	394	188	118	121	1,9	5
12	29	21,8	26,3	32,7	20,2	71	101101	407	133	135	95	1,9	5
12	30	21,6	27,9	33,8	20,0	64	100978	416	167	114	177	1,6	5
12	31	21,6	26,9	32,4	20,9	71	100930	411	183	115	129	1,4	5