

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONDICIONAMENTO DE
AR GEOTÉRMICO E O CONVENCIONAL E SUAS PERSPECTIVAS
PARA O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARLOS ROBERTO DE NARDIN

SANTA MARIA, RS, BRASIL

2015

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONDICIONAMENTO DE AR
GEOTÉRMICO E O CONVENCIONAL E SUAS PERSPECTIVAS PARA
O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL**

Por

Carlos Roberto De Nardin

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Santa Maria, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração em Processamento de Energia, para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

SANTA MARIA, RS, BRASIL

2015

De Nardin, Carlos Roberto
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONDICIONAMENTO DE AR
GEOTÉRMICO E O CONVENCIONAL E SUAS PERSPECTIVAS PARA O
SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL / Carlos Roberto De Nardin.-
2015.

171 p.; 30cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2015

1. Condicionamento térmico 2. Modelagem matemática 3.
Energia geotérmica superficial 4. Ponto de máxima troca
térmica 5. Eficiência energética I. Farret, Felix
Alberto II. Título.

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

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Carlos Roberto De Nardin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Duque de Caxias, n°. 2280/204, Santa Maria - RS. CEP 97060-210

Fone (0xx)55 84234440; E-mail: denardin@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

A Comissão Examinadora abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

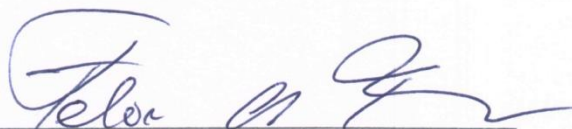
**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONDICIONAMENTO DE AR
GEOTÉRMICO E O CONVENCIONAL E SUAS PERSPECTIVAS PARA
O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL**

Elaborada por

Carlos Roberto De Nardin

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

Comissão Examinadora:



Felix Alberto Farret, PhD (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Lineu Belico dos Reis, Dr. (USP)



Alzenira da Rosa Abaide, Dr.^a (UFSM)

Santa Maria, 03 de junho de 2015

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Felix Alberto Farret pela amizade sincera, pelo apoio, atenção e confiança ao longo do trabalho.

Ao Centro de Estudo em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas Felipe Teixeira Fernandes, Adriano José Longo e Luciano Porto de Lima pelo espírito de grupo durante este trabalho.

Aos meus pais, Claudio (*in memoriam*) e Antonieta pela oportunidade da vida. A minha esposa Rosangela, meus filhos Anna Clara e Matheus pelo companheirismo nesta trajetória.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONDICIONAMENTO DE AR GEOTÉRMICO E O CONVENCIONAL E SUAS PERSPECTIVAS PARA O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL

AUTOR: CARLOS ROBERTO DE NARDIN
ORIENTADOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 03 de junho de 2015.

Esta dissertação trata da comparação do consumo de energia elétrica entre o ar condicionado convencional e o condicionamento térmico com a utilização da energia geotérmica superficial.

Foram realizados estudos sobre a constituição do solo, dos trocadores de calor e das características técnicas dos tubos para a circulação de água. Baseado nestes estudos foi realizado a montagem de um sistema de condicionamento utilizando a energia geotérmica superficial usando uma sala de testes e outra com a instalação de um ar condicionado convencional de janela num ambiente idêntico à sala de testes. Um circuito eletrônico mantém a temperatura na sala de referência com condicionamento de ar convencional em condições semelhantes a da sala de testes com condicionamento geotérmico, fazendo também o monitoramento do consumo de energia elétrica em ambos os equipamentos para fins comparativos.

Neste trabalho, utilizou-se o método heurístico *hill climbing control* (HCC) para gerenciamento da melhor troca térmica possível com o solo, em conjunto com um conversor de corrente contínua usado para regular a carga elétrica da bomba hidráulica e do ventilador utilizados no condicionador geotérmico. Experimentos foram realizados com e sem o uso do gerenciamento eletrônico, onde se comprova que este método de controle eletrônico aumenta o rendimento do condicionador geotérmico e reduz o seu consumo de energia elétrica.

Durante os experimentos o subsolo sofreu saturação no final do período de verão, devido à variação sazonal de temperatura do solo na profundidade adotada e também devido ao dimensionamento do trocador de calor geotérmico ser inferior ao planejado. Este fato, porém serviu para demonstrar que nesta condição o HCC não maximizou as trocas térmicas necessárias para o funcionamento adequado do condicionador geotérmico, e conseqüentemente, ocorreu um aumento do consumo de energia elétrica.

Entre as principais contribuições desta dissertação está o desenvolvimento de uma metodologia para estimação das trocas de calor entre o subsolo e o ambiente habitável. Pode-se incluir também a forma do dimensionamento das mangueiras a serem enterradas no subsolo e o controlador eletrônico para gerenciar as trocas térmicas entre o subsolo e o ambiente condicionado. Provou-se também a viabilização do uso da energia geotérmica superficial para condicionamento de ambientes habitados sem bombas de calor com a finalidade de reduzir o consumo de energia elétrica.

Palavras chave: condicionamento térmico, modelagem matemática, energia geotérmica superficial, ponto de máxima troca térmica, eficiência energética.

ABSTRACT

Master Thesis
Post-graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

COMPARATIVE STUDY BETWEEN GEOTHERMAL AND CONVENTIONAL AIR CONDITIONING AND PROSPECTS FOR THE NATIONAL ELECTRICAL SYSTEM

AUTHOR: CARLOS ROBERTO DE NARDIN
SUPERVISOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Date and Place: Santa Maria, June 3th, 2015.

This dissertation deals with a comparison between energy consumption of conventional air conditioning and the surface geothermal conditioning for room environments.

Studies have been conducted about soil constitution, heat exchangers and specifications of the tubes for water circulation. Based on these studies was the fitting of a conditioning system utilizing surface geothermal energy using a testing room and another one fitted with a conventional window air conditioner in an analog testing room environment. An electronic circuit maintains the temperature in the conventional air-conditioning reference room in similar conditions to the testing room using geothermal conditioning, also monitoring the power consumption in both units for comparative purposes.

In this study, it was used the hill-climbing heuristic method to control and manage the best possible heat exchange with the underground, together with a DC converter used to regulate the electrical load of the hydraulic pump and the fan used in the geothermal conditioner. Experiments were performed with and without electronic management, proving so that this electronic control method increases the geothermal conditioner yielding and reduces power consumption.

During the geothermal experiments the underground saturation suffered in the late summer period due to seasonal variation of soil temperature in the adopted depth and also

because the sizing of the geothermal heat exchanger was below than planned. This fact, however served to demonstrate that this HCC condition does not maximize the thermal exchanges necessary to the proper functioning of the geothermal conditioner, and consequently, having an increase in electric power consumption.

Among the major contributions of this dissertation is the development of a methodology for estimation of heat exchange between the basement and the living environment. One can also include how the sizing of the underground hoses and the electronic controller to manage the thermal exchanges between the underground and the conditioned environment. It proved also the feasibility of shallow geothermal energy for conditioning inhabited environments without heat pumps to reduce electricity consumption.

Keywords: thermal conditioning, mathematical modeling, surface geothermal energy, maximum heat transfer point and energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estimativa do consumo unitário de equipamentos nos domicílios para o ano de 2014	24
Figura 1.2 - Balanço energético do planeta Terra	25
Figura 1.3 - Exemplo do aproveitamento da energia geotérmica superficial	26
Figura 2.1 - Distribuição de temperaturas de várias profundidades no solo em um ano	31
Figura 3.1 - Amplitude das temperaturas sazonais em função da profundidade do solo	40
Figura 4.1 - Transferência de calor por condução em tubos	42
Figura 4.2 - Esquema elétrico equivalente para a troca de calor geotérmica	44
Figura 4.3 - Transferência de calor por condução em um tubo enterrado na profundidade Z	45
Figura 4.4 - Anemômetro DAVIS LCA6000 e termômetro CEM DT-8880	50
Figura 5.1 - Esquema do sistema de transferência térmica	53
Figura 5.2 - Foto da casa protótipo	54
Figura 5.3 - Planta baixa	55
Figura 5.4 - Controle do condicionador de ar	55
Figura 5.5 - Fluxograma do controle do ar condicionado	56
Figura 5.6 - Representação teórica do algoritmo HCC	57
Figura 5.7 - Controle do condicionador geotérmico e aquisição de dados	59
Figura 5.8 - Fluxograma do controle HCC do condicionador geotérmico	60
Figura 5.9 - Fluxograma da aquisição de dados	61
Figura 5.10 - Circuito buck utilizado	62
Figura 5.11 - (a) ciclo com a chave fechada; (b) chave aberta	63
Figura 5.12 - Detalhe da mangueira enterrada a 5 metros de profundidade	66
Figura 5.13 - Detalhe da mangueira enterrada a 3,5 metros de profundidade	66
Figura 5.14 - Detalhe da entrada das mangueiras e isolamento térmico em PVC	67
Figura 5.15 - Detalhe da amarração das espiras das mangueiras	68
Figura 5.16 - Detalhe ilustrativo da localização do condicionador geotérmico	69
Figura 5.17 - Vista superior dos equipamentos e sensores instalados	69
Figura 5.18 - Temperaturas médias mensais do município de Água Branca - AL	71
Figura 5.19 - Temperaturas médias mensais do município de Barbalha - CE	71
Figura 5.20 - Temperaturas médias mensais do município de Brasília – DF	72
Figura 6.1 - Foto do trocador de calor geotérmico e do ar condicionado	75

Figura 6.2 - Temperaturas do dia 03 de setembro de 2013	76
Figura 6.3 - Temperaturas do dia 19 de janeiro de 2013	77
Figura 6.4 - Temperaturas do dia 19 de julho de 2013	77
Figura 6.5 - Temperaturas do dia 11 de agosto de 2013	78
Figura 6.6 - Temperaturas do dia 28 de maio de 2014	81
Figura 6.7 - Temperaturas do dia 30 de maio de 2014	81
Figura 6.8 - Consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico no dia 30 de maio ..	82
Figura 6.9 - Consumo de energia elétrica do ar condicionado no dia 30 de maio	82
Figura 6.10 - Temperaturas do dia 05 de junho de 2014	83
Figura 6.11 - Temperaturas dos dias 02 e 03 de junho de 2014	84
Figura 6.12 - Temperaturas dos dias de 28 de maio a 08 de junho de 2014	85
Figura 6.13 - Consumo de energia elétrica dos dias de 28 de maio a 08 de junho de 2014 ...	85
Figura 6.14 - Temperaturas dos dias de 18 a 30 de junho de 2014	86
Figura 6.15 - Consumo de energia elétrica dos dias de 18 a 30 de junho de 2014	86
Figura 6.16 - Temperaturas dos dias de 01 a 13 de julho de 2014	87
Figura 6.17 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 13 de julho de 2014	87
Figura 6.18 - Temperaturas dos dias de 22 a 30 de julho de 2014	88
Figura 6.19 - Consumo de energia elétrica dos dias de 22 a 30 de julho de 2014	88
Figura 6.20 - Temperaturas dos dias de 05 a 16 de agosto de 2014	89
Figura 6.21 - Consumo de energia elétrica dos dias de 05 a 16 de agosto de 2014	89
Figura 6.22 - Consumo de energia elétrica de 28 de maio a 16 de agosto de 2014	90
Figura 6.23 - Temperatura média de 28 de maio a 16 de agosto de 2014	90
Figura 6.24 - Temperaturas do dia 08 de junho de 2014	91
Figura 6.25 - Temperaturas do dia 09 de junho de 2014	92
Figura 6.26 - Temperaturas dos dias de 08 a 18 de junho de 2014	92
Figura 6.27 - Temperaturas dos dias de 18 a 21 de julho de 2014	93
Figura 6.28 - Temperaturas do dia 23 de outubro de 2014	94
Figura 6.29 - Temperaturas dos dias de 23 de outubro a 04 de novembro de 2014	95
Figura 6.30 - Temperaturas do dia 29 de outubro de 2014	95
Figura 6.31 - Temperaturas dos dias de 06 a 11 de novembro de 2014	96
Figura 6.32 - Temperaturas dos dias de 13 a 22 de novembro de 2014	97
Figura 6.33 - Consumo de energia elétrica dos dias de 13 a 22 de novembro de 2014	97
Figura 6.34 - Temperaturas dos dias de 23 a 30 de novembro de 2014	98
Figura 6.35 - Consumo de energia elétrica dos dias de 23 a 30 de novembro de 2014	98

Figura 6.36 - Temperaturas do dia 27 de novembro de 2014	100
Figura 6.37 - Temperaturas do dia 08 de dezembro de 2014	100
Figura 6.38 - Temperaturas dos dias de 01 a 15 de dezembro de 2014	101
Figura 6.39 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 15 de dezembro de 2014	101
Figura 6.40 - Temperaturas dos dias de 16 a 31 de dezembro de 2014	102
Figura 6.41 - Consumo de energia elétrica dos dias de 16 a 31 de dezembro de 2014	102
Figura 6.42 - Temperaturas dos dias de 01 a 15 de janeiro de 2015	103
Figura 6.43 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 15 de janeiro de 2015	103
Figura 6.44 - Temperaturas dos dias de 16 a 31 de janeiro de 2015	104
Figura 6.45 - Consumo de energia elétrica dos dias de 16 a 31 de janeiro de 2015	104
Figura 6.46 - Temperaturas dos dias de 01 a 14 de fevereiro de 2015	105
Figura 6.47 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 14 de fevereiro de 2015	105
Figura 6.48 - Temperaturas dos dias de 15 a 28 de fevereiro de 2015	106
Figura 6.49 - Consumo de energia elétrica dos dias de 15 a 28 de fevereiro de 2015	106
Figura 6.50 - Consumo de energia elétrica de 23 de novembro de 2014 a 28 de fevereiro de 2015	107
Figura 6.51 - Temperatura média de 23 de novembro de 2014 a 28 de fevereiro de 2015 ..	107
Figura 6.52 - Consumo de energia elétrica total	108
Figura A.1 - Circuitos utilizados no controle HCC e placa de aquisição de dados	121
Figura A.2 - Circuitos utilizados no controle do ar condicionado	127
Figura B.1 - Diagrama esquemático da aquisição de dados	137
Figura C.1 - Circuito elétrico para calibrar a tensão de saída do sensor de corrente	147
Figura D.1 - Circuito elétrico do sensor de tensão de alimentação do condicionador geotérmico	149
Figura D.2 - Circuito elétrico do sensor de tensão de alimentação do ar condicionado	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores típicos aproximados dos calores específicos mássicos e das massas específicas das frações constituintes do solo	38
Tabela 4.1 - Temperatura do fluxo de ar na entrada e na saída no trocador de calor	48
Tabela 4.2 - Fluxo de ar no trocador de calor	49
Tabela 5.1 - Parâmetros calculados e utilizados para o projeto do conversor <i>buck</i>	64
Tabela 5.2 - Dimensionamento do trocador de calor geotérmico	68
Tabela 5.3 - Custo dos componentes do protótipo	73
Tabela 6.1 - Horário de máxima transferência térmica	78
Tabela 6.2 - Resultados finais para o período de 28 de maio a 16 de agosto de 2014	93
Tabela 6.3 - Valores de alimentação do condicionador geotérmico	99
Tabela C.1 - Valores dos componentes utilizados	147
Tabela C.2 - Medição das tensões de saída do circuito em função da corrente de entrada ..	148
Tabela D.1 - Valores dos componentes utilizados no sensor de tensão	149
Tabela D.2 - Valores dos componentes utilizados no sensor de tensão do ar condicionado	150
Tabela D.3 - Medição das tensões de saída do circuito em função da tensão de entrada	150

LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE	<i>The American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers</i>
CC	Corrente contínua
BDMEP	Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa
CEESP	Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência
EGS	Energia geotérmica superficial
EUA	Estados Unidos da América
HAP	<i>Hourly Analysis Program</i>
HCC	<i>Hill climbing control</i>
HVAC	<i>Heating, ventilating and air conditioning</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IGSHPA	<i>International Ground Source Heat Pump Association</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LCD	<i>Liquid-crystal display</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PPGEE	Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica
PVC	Poli Cloreto de Vinila
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
RTC	<i>Real-time clock</i>
SD	<i>Secure digital</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

- c_s capacidade de aquecimento volumétrico do solo ($kJ \times m^{-3} \times K^{-1}$)
- c_m calor específico mássico de minerais ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)
- f_m fração volumétrica de minerais
- c_o calor específico mássico de matéria orgânica ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)
- f_o fração volumétrica de matéria orgânica
- c_a calor específico mássico da água ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)
- f_a fração volumétrica da água
- c_g calor específico mássico do ar ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)
- f_g : fração volumétrica do ar
- \dot{Q} taxa de condução de calor (W ou $J \times s^{-1}$)
- A área da seção transversal (m^2)
- ΔT gradiente de temperatura (K ou $^\circ C$)
- ℓ distância percorrida (m)
- k condutividade térmica ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)
- α difusividade térmica ($m^2 \times s^{-1}$)
- $t_{soil}(Z, t_{year})$ temperatura do solo na profundidade Z em relação ao tempo ($^\circ C$)
- t_{mean} temperatura média do meio ambiente ($^\circ C$)
- t_{amp} amplitude da temperatura do meio ambiente ($^\circ C$)
- Z profundidade abaixo da superfície (m)
- t_{year} tempo atual (dia)
- t_{shift} dia do ano em que ocorreu a mínima temperatura ambiente (dia)
- $\frac{dT}{dr}$ gradiente de temperatura na direção radial
- T_a temperatura da água ($^\circ C$)
- T_s temperatura do solo ($^\circ C$)
- S fator de forma de condução (m)
- h coeficiente de transferência de calor por convecção ($W \times m^{-2} \times ^\circ C^{-1}$)
- D diâmetro (m)
- L comprimento (m)
- N_u número de Nusselt
- R_e número de Reynolds

P_r número de Prandtl
 ν viscosidade cinemática ($m^2 \times s^{-1}$)
 V velocidade de deslocamento do fluido ($m \times s^{-1}$)
 μ viscosidade dinâmica ($kg \times m^{-1} \times s^{-1}$)
 ρ densidade do fluido ($kg \times m^{-3}$)
 T_e temperatura na entrada do fluxo de ar ($^{\circ}C$)
 T_s temperatura após a passagem pelo trocador de calor ($^{\circ}C$)
 \dot{m} vazão mássica do ar ($kg \times h^{-1}$)
 V_i tensão da fonte (V)
 V_o tensão no motor (V)
 R_a resistência da armadura (Ω)
 L_a indutância da armadura (H)
 E_a tensão induzida (V)
 w ciclo de trabalho
 t_s tempo de condução da chave S (s)
 f frequência do chaveamento (Hz)
 V_i tensão da fonte (V)
 ΔV_{C1max} variação máxima da tensão do capacitor C_1 (V)
 I_a corrente do motor (A)
 ΔV_o variação da tensão no motor (V)
 r_1 raio interno do cilindro (m)
 r_2 raio externo do cilindro (m)
 T_1 temperatura interna do cilindro ($^{\circ}C$)
 T_2 temperatura externa do cilindro ($^{\circ}C$)
 D_i diâmetro interno do cilindro (m)
 D_o diâmetro externo do cilindro (m)
 R_{parede} resistência térmica da mangueira ($m^2 \times K \times W^{-1}$)
 S_{parede} condutância térmica da mangueira ($W \times m^{-2} \times K^{-1}$)
 R_{solo} resistência térmica do solo ($m^2 \times K \times W^{-1}$)
 S_{solo} condutância térmica do solo ($W \times m^{-2} \times K^{-1}$)
 R_{fluido} resistência térmica do fluido ($m^2 \times K \times W^{-1}$)
 R_{total} resistência térmica total ($m^2 \times K \times W^{-1}$)
 T_{ref} temperatura na sala de referência ($^{\circ}C$)

T_{geo} temperatura na sala de referência ($^{\circ}C$)

T_{out} temperatura na saída de ar do trocador de calor ($^{\circ}C$)

D ciclo de trabalho (*duty cycle*)

ΔD incremento do ciclo de trabalho

T_{old} leitura prévia de T_{out} ($^{\circ}C$)

N viscosidade cinemática ($m^2 \times s^{-1}$)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Generalidades	23
1.2 Objetivos desta dissertação	26
1.2.1 Objetivo geral	26
1.2.2 Objetivos específicos	26
1.3 Justificativas	27
1.4 Organização dos capítulos	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Energia solar irradiada sobre a superfície da Terra	29
2.2 Comportamento térmico do solo	30
2.3 Energia geotérmica para condicionamento de ambientes	31
2.4 Controle <i>hill climbing</i>	33
2.5 Conversores de corrente contínua para condicionamento geotérmico	34
2.6 Resumo do capítulo	35
3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECIMENTO DO SOLO	37
3.1 Introdução	37
3.2 Características térmicas do solo	37
3.2.1 Capacidade térmica volumétrica	37
3.2.2 Condutividade térmica do solo	38
3.2.3 Difusividade térmica do solo	39
3.3 Distribuição vertical das temperaturas	39
3.4 Resumo do capítulo	40
4 DESCRIÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR	41
4.1 Introdução	41
4.1.1 Troca de calor por condução	41
4.1.2 Troca de calor convectiva	41
4.2 Trocas de calor no subsolo	41
4.2.1 Condução de calor através de configurações cilíndricas	42
4.2.2 Resistência térmica na parede cilíndrica	43
4.2.3 Transferência de calor combinado em sistemas radiais	44
4.3 Trocas de calor na sala protótipo	47

4.4	Resumo do capítulo	50
5	IMPLANTAÇÃO PRÁTICA	53
5.1	Introdução	53
5.2	Controle e monitoramento do ar condicionado	55
5.3	Controle <i>hill climbing</i>	57
5.4	Controle e monitoramento do condicionador geotérmico	58
5.5	Aquisição de dados	60
5.6	Conversor CC/CC	61
5.7	Carga térmica das salas	65
5.8	Trocadores de calor	65
5.8.1	Trocador de calor geotérmico	65
5.9	Análise de viabilidade	70
5.10	Vida útil	73
5.11	Resumo do capítulo	73
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
6.1	Introdução	75
6.2	Temperaturas nas salas nas condições naturais	76
6.3	Condicionamento térmico da sala de testes sem o controle eletrônico HCC	76
6.4	Condicionamento da sala de teste com o controle eletrônico HCC	79
6.4.1	Uso do condicionador geotérmico para aquecimento	80
6.4.1.1	Comparação do consumo de energia elétrica entre o condicionador geotérmico e o convencional	80
6.4.1.2	Resultados parciais do consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico e do convencional para aquecimento	90
6.4.1.3	Temperatura média em cada sala durante o inverno de 2014	90
6.4.1.4	Comportamento térmico na sala de referência sem condicionador de ar comercial	91
6.4.1.5	Resultados finais com o condicionador geotérmico para aquecimento	93
6.4.2	Condicionador geotérmico para arrefecimento	94
6.4.2.1	Comportamento térmico na sala de referência sem condicionador de ar	94
6.4.2.2	Comparação do consumo de energia elétrica entre o condicionador geotérmico e o convencional	96

6.4.2.3 Resultados parciais do consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico e do convencional para arrefecimento	107
6.4.2.4 Temperatura média em cada sala durante o verão de 2014 – 2015	107
6.4.2.5 Resultados finais comparativos do condicionador geotérmico e do Convencional	108
6.5 Perspectivas de aplicação no sistema elétrico nacional	108
6.6 Resumo do capítulo	109
7 CONCLUSÕES	111
7.1 Principais contribuições	112
7.2 Trabalhos futuros	113
PUBLICAÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO	115
BIBLIOGRAFIA	117
APÊNDICE	121
APÊNDICE A - CIRCUITOS UTILIZADOS	121
A.1 Controle HCC	121
A.2 Código fonte do controle HCC	122
A.3 Controle do ar condicionado com aquisição de dados	127
A.4 Código fonte do controle do ar condicionado	127
APÊNDICE B - AQUISIÇÃO DE DADOS	137
B.1 Diagrama esquemático	137
B.2 Código fonte da aquisição de dados	138
APÊNDICE C - SENSORES DE CORRENTE.....	147
C.1 Circuito eletrônico de condicionamento de sinais	147
C.2 Calibração dos sensores	148
APÊNDICE D - SENSORES DE TENSÃO	149
D.1 Circuito eletrônico dos sensores de tensão do condicionador geotérmico	149
D.2 Circuito eletrônico do sensor de tensão do ar condicionado	149
D.3 Calibração do sensor de tensão do ar condicionado	150
APÊNDICE E - LEVANTAMENTO DA CARGA TÉRMICA	151
E.1 Carga térmica da sala de teste para calefação	151
E.2 Carga térmica da sala de teste para arrefecimento	152
E.3 Carga térmica da sala de referência para calefação	153

E.4 Carga térmica da sala de referência para arrefecimento	154
ANEXOS	155
ANEXO I - MICROCONTROLADOR PIC16F877A	155
ANEXO II - MICROCONTROLADOR PIC18F4520	157
ANEXO III - SENSOR DE TEMPERATURA	159
ANEXO IV - BOMBA HIDRÁULICA	161
ANEXO V - VENTILADOR	163
ANEXO VI - AR CONDICIONADO	165
ANEXO VII - TABELA DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA SATURADA	167
ANEXO VIII - TABELA DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	169

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo acentuadamente em todos os setores e particularmente nos setores residencial e comercial, isto se deve ao aumento do uso de aparelhos eletrodomésticos em geral. A falta de planejamento e políticas adequadas somadas a um modelo arquitetônico de construção de residências e salas comerciais que consideram muito pouco o aproveitamento da climatização e iluminação naturais. Além disto, a urbanização das cidades tem levado em consideração apenas a estética dos edifícios e os lucros imobiliários, sem se preocupar muito com uso racional de energia elétrica e dos ambientes. Estes fatos aliados à falta de investimentos em novas hidrelétricas têm obrigado o país a utilizar a geração de energia elétrica não hídrica, o que eleva consideravelmente os custos de geração e também as agressões ao meio ambiente.

O aumento crescente do consumo de energia elétrica sem o acompanhamento de geração no mesmo patamar torna pertinente uma busca por novas fontes de energia, que preferencialmente devem ser limpas, renováveis e seguras, bem como das novas tecnologias que não podem deixar de lado o uso racional e mais eficiente da energia disponível atualmente.

O consumo residencial de energia elétrica representa aproximadamente 26,3% do consumo total do sistema brasileiro, conforme levantamento publicado em 2013 pela (EPE [1]). O consumo final da carga residencial de energia elétrica por tipo de aparelho no Brasil está representado na figura 1.1. Note-se que 22% desta carga se deve aos aparelhos de ar condicionado, conforme estimativa da evolução do consumo de equipamentos nos domicílios para o ano de 2014, (NOTA TÉCNICA DEA 14/10 [2]). Como o consumo doméstico de energia elétrica se intensificou consideravelmente nos últimos anos devido ao aumento de ambientes com condicionamento de ar, esta dissertação propõe a utilização da energia geotérmica superficial (EGS) como uma alternativa de solução para este problema.

A EGS é definida como a energia térmica armazenada no subsolo a poucos metros da superfície (Geotics [3]). Nestas profundidades a temperatura tende a variar muito pouco ao longo do ano e pode ser aproveitada para troca de calor com equipamentos na superfície. O princípio básico de funcionamento do condicionamento geotérmico superficial é a retirada do calor da camada superficial do terreno, através da circulação de um fluido refrigerante em serpentinas instaladas no subterrâneo e no ambiente a ser condicionado. A circulação do

fluido dentro das serpentinas enterradas é feita com o auxílio de uma bomba hidráulica de pequeno porte, fazendo com que ocorra a troca de calor entre o solo e o ambiente externo. Portanto, a energia geotérmica deve ser considerada como uma alternativa viável para o uso racional da energia elétrica e a redução da carga elétrica nacional para condicionamento de ambientes.

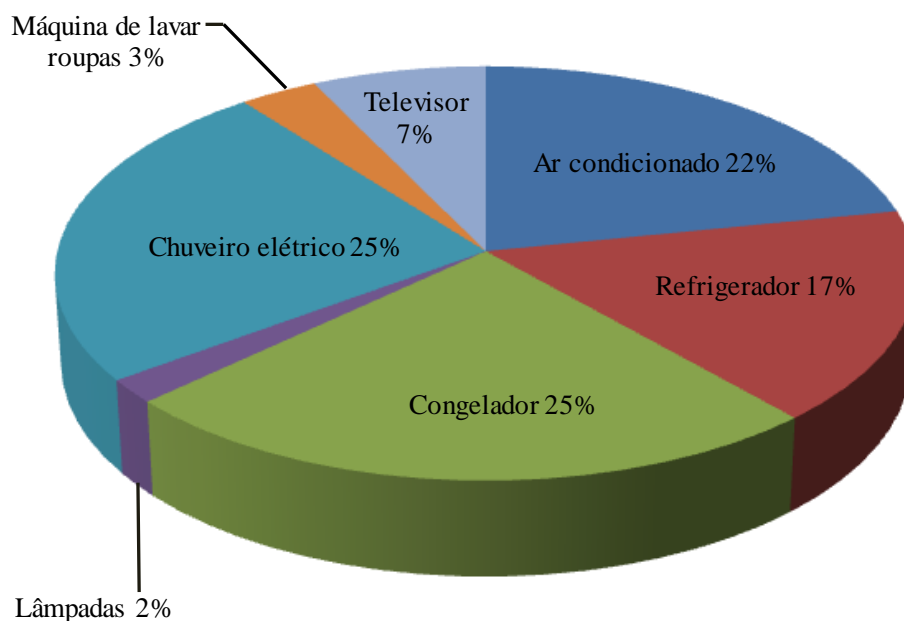


Figura 1.1 – Estimativa do consumo unitário de equipamentos nos domicílios para o ano de 2014 (Fonte: *Nota técnica DEA [2]*)

Uma fonte inesgotável, limpa e permanente de energia é o Sol. (*Palz [4]*) estima que a energia solar recebida pela Terra a cada ano é dez vezes superior a contida em toda a reserva de combustíveis fósseis. (*Ogura et al. [5]*) afirmam que em apenas uma hora, o Sol libera sobre a Terra uma quantidade de energia superior ao consumo global de um ano inteiro. Segundo a (*NASA [6]*), praticamente a metade da energia solar que atinge a Terra diariamente fica armazenada no solo na forma de calor, denominada de energia geotérmica superficial, como representado na figura 1.2. Esta energia varia de acordo com a posição geográfica e altitude da localidade, e é mais intensa em regiões tropicais e diminui de intensidade em direção aos polos do planeta.

A temperatura no solo varia mês a mês, em função da radiação solar incidente, das chuvas, das oscilações sazonais de temperatura, da cobertura vegetal local, do tipo de solo e da profundidade na terra. Normalmente, na profundidade de poucos centímetros, as

amplitudes das variações sazonais de temperaturas do solo se encontram em fase com as variações sazonais da temperatura ambiente.

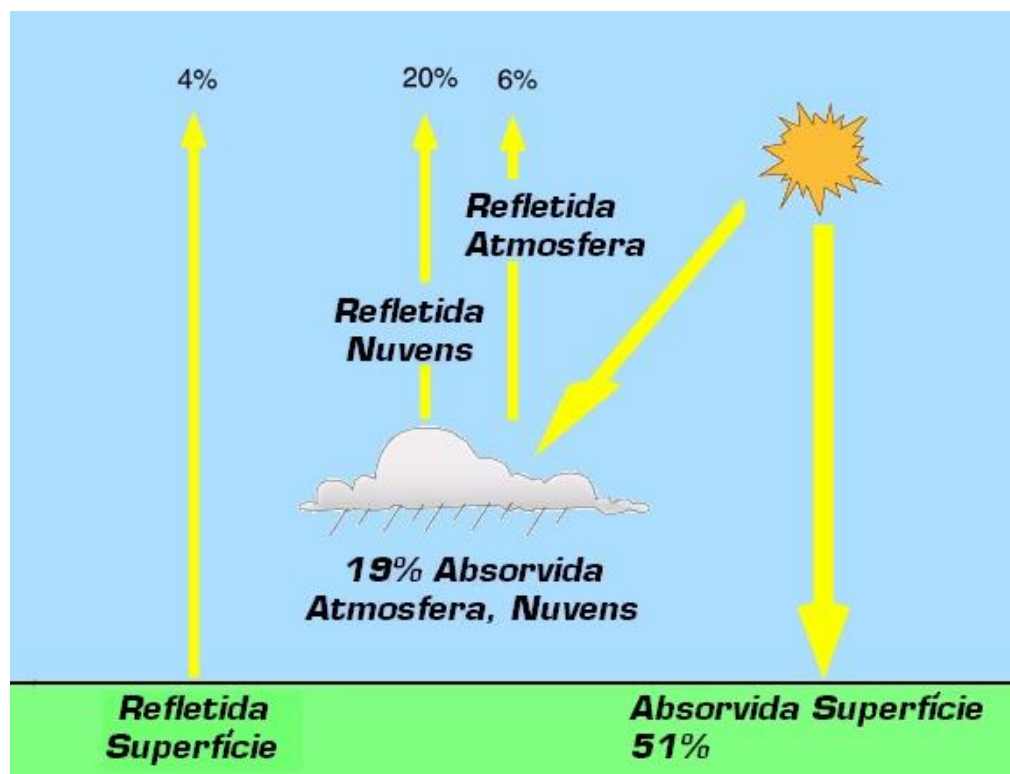


Figura 1.2 – Balanço energético do planeta Terra (Fonte: NASA [6])

As mudanças sazonais na temperatura do solo profundo são menos significativas do que as mudanças sazonais na temperatura do ar sobrejacente. Conforme a profundidade do solo, existe uma defasagem de temperatura nos pontos de mínimo e máximo em relação à superfície, devido à capacidade térmica do solo ser muito maior em relação ao ar (grande constante de tempo) e ao isolamento térmico fornecido pela vegetação. Este atraso de fase se intensifica com a profundidade e a sua amplitude diminui, assim, na primavera o solo naturalmente aquece mais lentamente em relação ao ar e no verão torna-se mais frio do que o ar sobrejacente, tornando-se um sumidouro natural para a remoção de calor em edificações. Da mesma forma, no outono o solo arrefece mais lentamente em relação ao ar e no inverno se encontra mais quente do que o ar que se sobrepõe, fazendo com que se possa utilizar isto como uma fonte natural para fornecimento de calor em edificações. A figura 1.3 ilustra o uso da energia geotérmica superficial para climatização de ambientes.

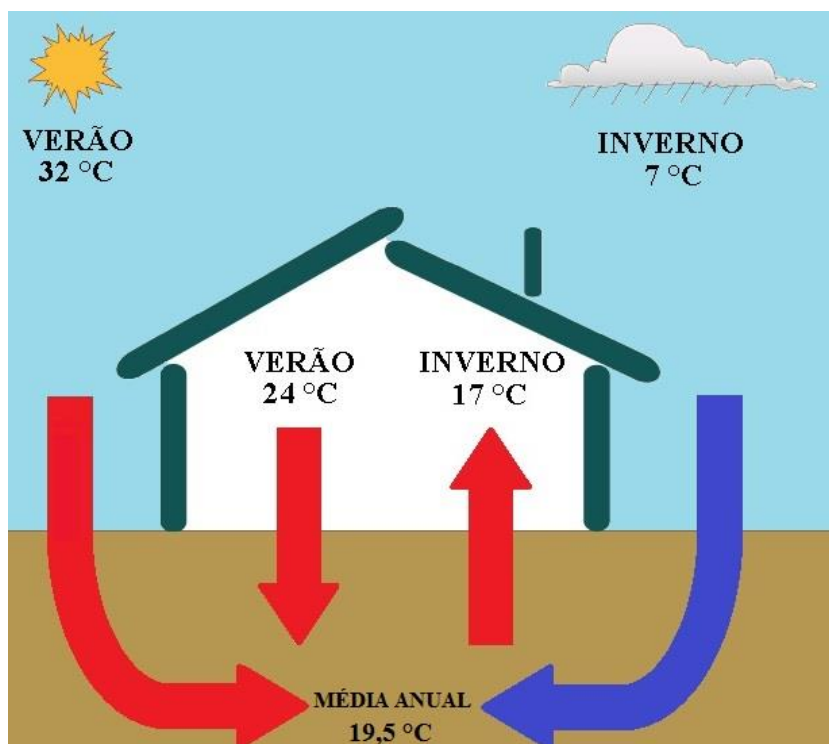


Figura 1.3 – Exemplo do aproveitamento da energia geotérmica superficial

1.2 Objetivos desta Dissertação

1.2.1 Objetivo geral

Demonstrar a redução do consumo de energia elétrica para condicionamento de ambientes e melhorar a eficiência energética de residências ou de pequenas empresas pela redução da curva de demanda individual. Pretende-se uma redução de carga, principalmente em horários críticos como os horários de ponta e os horários comerciais, através da diminuição das necessidades de consumo de energia elétrica no condicionamento térmico de ambientes, utilizando a energia geotérmica superficial como fonte de calor.

1.2.2 Objetivos específicos

Esta dissertação visa os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver tecnologia para suprir a carga térmica de ambientes, utilizando a energia geotérmica superficial para reduzir o consumo de energia elétrica local e com vistas à extensão ao sistema nacional;
- b) Estudar no modelo proposto as melhores condições para troca do calor proveniente do subsolo com a circulação de água;

- c) Verificar a viabilidade técnica da utilização de energia geotérmica superficial (EGS) para condicionamento térmico de ambientes;
- d) Estabelecer uma metodologia para dimensionar os diversos componentes que compõem a troca de energia geotérmica, como valas, mangueiras e trocadores de calor;
- e) Projetar e implementar um conjunto de conversores CC/CC e sensores de corrente e tensão, para rastrear o ponto de máxima troca térmica com o subsolo;
- f) Estabelecer, projetar e implementar um sistema de aquisição de dados, visando medir e armazenar as tensões e correntes da bomba hidráulica, do ventilador e do ar condicionado, bem como as temperaturas do meio ambiente, da sala de teste e da sala de referência, de entrada e saída da água no subsolo;
- g) Realizar testes práticos para comprovação da eficiência energética produzida, com as técnicas propostas nesta dissertação.
- h) Avaliar os reflexos que a redução de demanda para condicionamento de ambientes pode ter sobre a demanda do sistema nacional.

1.3 Justificativas

De acordo com diversos autores (*Florides et al. [7]; Kasuda [8]; Williams et al. [9]; Farret et al. [10]*), o solo tem a capacidade de reter uma imensa quantidade de calor, de tal modo que a sua temperatura a poucos metros da superfície sofre apenas uma pequena variação ao longo de todo o ano. Esta variação diminui com o aumento da profundidade do solo. O condicionamento geotérmico de ambientes proposto nesta dissertação utiliza apenas circulação fechada de água na troca térmica e um ventilador que movimenta o ar em torno do trocador de calor localizado no ambiente externo. Este condicionamento demanda pouca potência da bomba hidráulica para vencer a circulação da água (princípio dos vasos comunicantes), e pode assim extrair a energia geotérmica acumulada no subsolo e distribuir no ambiente para oferecer conforto térmico com baixíssimo consumo de energia elétrica.

1.4 Organização dos capítulos

Nesta dissertação, os capítulos estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução. Apresenta-se uma breve introdução sobre o consumo de energia elétrica residencial no Brasil. Em seguida, comenta-se sobre a condução do calor no solo, do princípio de funcionamento do condicionamento geotérmico de ambientes e da possibilidade do uso da energia geotérmica para o consumo racional de energia elétrica.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica. Neste capítulo são apresentadas as revisões bibliográficas referentes às trocas térmicas no subsolo e as aplicações destas temperaturas para condicionamento térmico de ambientes habitados.

Capítulo 3: Modelagem matemática do aquecimento do solo pelo sol. Apresenta-se um equacionamento do comportamento da distribuição de temperaturas no solo de acordo com o tempo, a difusividade térmica do solo, a temperatura média ambiente e a profundidade no solo.

Capítulo 4: Descrição dos modelos de troca de calor. Apresenta-se uma breve introdução ao modelo de condicionamento térmico proposto. Após apresenta-se os estudos sobre as trocas de calor no ambiente proposto e sobre as trocas de calor com o subsolo.

Capítulo 5: Implantação prática. Neste capítulo, são apresentados o dimensionamento para a construção dos trocadores de calor, o projeto do conversor CC/CC, a implantação do controle *hill climbing* para obter o ponto ótimo de troca térmica com o solo e a implantação do controle de temperatura do ar condicionado, para que possa ser feita a comparação de consumo de energia elétrica entre os equipamentos. Também faz parte deste capítulo a análise de viabilidade técnica.

Capítulo 6: Resultados experimentais. Apresentam-se os resultados obtidos do dia 28 de maio de 2014 até o dia 28 de fevereiro de 2015. São feitas medições de temperaturas das trocas térmicas envolvidas, do consumo de energia elétrica do sistema geotérmico e do ar condicionado. Os resultados experimentais do condicionador geotérmico são comparados ao consumo de energia elétrica do ar condicionado, também se compara a temperatura da sala condicionada com o sistema geotérmico em relação à temperatura ambiente de uma sala de referência com condições similares à sala de teste.

Capítulo 7: Conclusão. Apresentam-se neste capítulo as conclusões desta dissertação com uma discussão referente a cada um dos temas abordados nos capítulos 3, 4, 5 e 6, de modo a identificar os principais itens que foram importantes para a realização deste trabalho, as suas contribuições com relação a este campo de pesquisa e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão reunidas diversas publicações sobre pesquisas relativas ao uso da energia geotérmica superficial e abordadas nesta dissertação. Foram feitas pesquisas em anais de congressos, periódicos, além de teses de doutorado, dissertações de mestrado e livros. Esta revisão bibliográfica está dividida em seções com os seguintes temas:

2.1 Energia solar irradiada sobre a superfície da Terra

Segundo a NASA [6], a metade da energia que o Sol irradia sobre a Terra diariamente fica armazenada na superfície dos continentes e oceanos na forma de calor. Esta energia mantém o planeta aquecido e é denominada de energia geotérmica superficial.

De acordo com Ogura et al. [5], em uma hora o Sol irradia sobre a terra uma quantidade de energia suficiente para suprir as necessidades energéticas do planeta Terra por um ano. Palz [4] estima que a energia solar recebida pela Terra a cada ano é dez vezes superior à contida em toda a reserva de combustíveis fósseis.

O Ministério do Meio Ambiente [43], afirma que a radiação solar no país varia de 8 a 22 MJ/m² durante o dia, sendo que as menores variações ocorrem nos meses de maio a julho, quando a radiação varia entre 8 e 18 MJ/m². O nordeste brasileiro é a região de maior radiação solar, com média anual comparável às melhores regiões do mundo, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no Deserto de Mojave, Califórnia, EUA. O MMA também afirma que conforme dados do relatório "Um Banho de Sol para o Brasil" do Instituto Vitae Civilis, o Brasil, por sua localização e extensão territorial, recebe energia solar na ordem de 50 mil vezes o seu consumo anual de eletricidade.

Ainda de acordo com o Ministério do Meio Ambiente [43], a energia solar térmica, além de ser uma "geração distribuída", e por isso não provocar demanda por "upgrade" de linhas de transmissão, não requer investimentos governamentais, aumenta a "renda média" da população assalariada das classes mais baixas (na medida em que reduz a conta de energia elétrica), melhora o conforto das populações distantes a um custo ínfimo e reduz a demanda por investimentos em novas usinas geradoras de eletricidade. Esta dissertação tem justamente como objetivo o aproveitamento desta energia armazenada pelo sol no subsolo sem usar máquina térmica.

2.2 Comportamento térmico do solo

Nesta seção são apresentados trabalhos referentes às trocas térmicas envolvidas no solo que vão servir como base para o aproveitamento da energia geotérmica superficial, tema desta dissertação.

O aproveitamento da energia térmica é baseado na capacidade que uma área escolhida de solo tem para trocar calor com o meio externo. Para um projeto desta natureza é necessário definir o potencial energético disponível, além das dimensões e quantidades dos componentes envolvidos. Os parâmetros físicos básicos são a temperatura do perfil vertical e a condutividade térmica do solo.

Conforme Prevedello [31], a caracterização do regime térmico do solo depende da sua localização e do tipo de solo. A identificação dos tipos de solos depende de uma série de grandezas que caracterizam as suas propriedades físicas, que determinam o comportamento das propriedades térmicas do solo, onde as mais importantes são a massa específica (ρ), condutibilidade térmica (λ) e capacidade térmica (C). Este autor não apresenta nenhuma relação ao aproveitamento deste calor para conforto térmico.

Os solos estão sujeitos às variações climáticas que ocorrem na superfície. A propagação de calor nos solos depende de suas características térmicas cujo conhecimento é necessário para a modelagem do fluxo de calor, segundo Prevedello [31], a capacidade do solo em armazenar e transferir calor é determinada pelas suas propriedades térmicas e condições meteorológicas. Os modos de transmissão de calor mais importantes são: condução, convecção e radiação. Não há nenhuma alusão à transferência deste calor para o meio externo.

Kasuda et al. [8] e Florides et al. [7] apresentam um modelo que estima a temperatura do solo em diversas profundidades em função do tempo. O método baseia-se nas oscilações de temperatura da superfície e leva em consideração a condutividade térmica do solo e o tempo decorrido a partir da temperatura mínima do meio ambiente.

Conforme Kasuda [8], à medida que a profundidade do solo aumenta ocorre uma diminuição exponencial da amplitude da variação de temperatura, e também um atraso de fase. Os pontos de máximos e mínimos vão gradativamente sofrendo um atraso em relação à superfície. Florides et al. [7] apresentam um gráfico anual com profundidades de até 20 metros, como pode ser visto na figura 2.1.

Longo [24] realizou medições no campus experimental do CEESP - UFSM, na profundidade de cinco metros houve oscilação de temperatura entre 18 e 22 °C durante um

ano. Segundo Williams et al. [9], a partir de 10 metros de profundidade a temperatura do solo se mantém constante durante todo o ano e é igual à temperatura média anual do ambiente acima da superfície. No caso de Santa Maria – RS, a temperatura média do ambiente acima da superfície é de 19,5 °C conforme dados do INMET [25].

Esta regra vale para todos os locais do planeta, exceto para as regiões que são cobertas por uma grossa camada de neve por longos períodos de tempo. Isto se deve ao manto de neve que tem características de isolamento térmico, e com isso interfere nas trocas térmicas entre o solo e o meio ambiente. Nesta publicação, não são discutidos os meios de transferência de calor para condicionamento térmico.

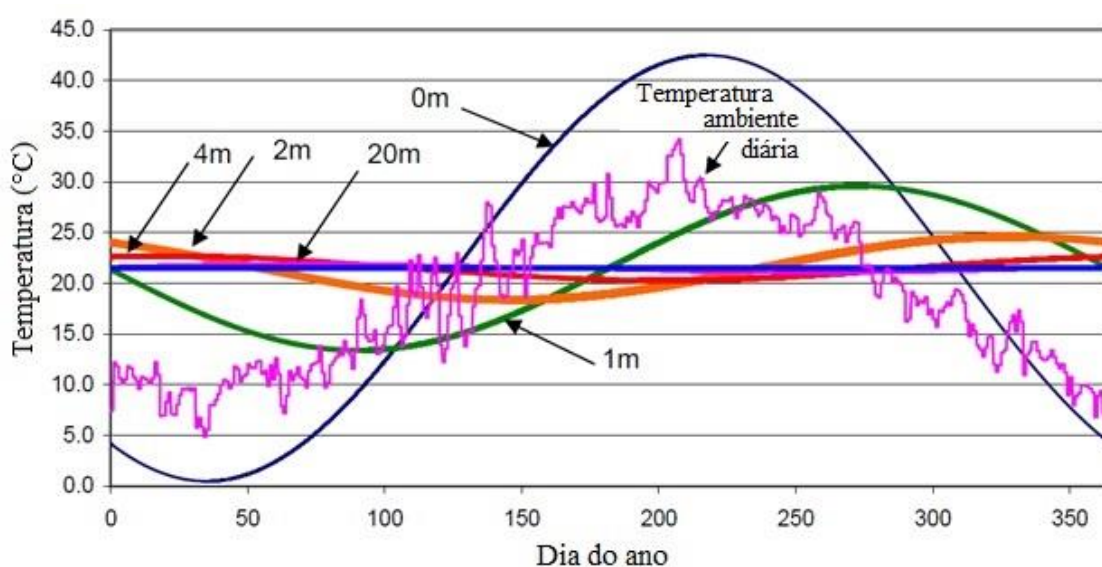


Figura 2.1 - Distribuição de temperaturas de várias profundidades no solo em um ano (Fonte: Florides, et al. [7])

Pereira, P. B. et al. [41] apresentam o mapa brasileiro da média anual de temperatura e o mapa da média anual de umidade relativa, bem como o mapa da média anual da radiação solar. Estes dados são importantes para o projeto do trocador de calor geotérmico.

Çengel [11] apresenta os modelos de trocas térmicas com o solo para dutos enterrados. Estes mecanismos de transmissão de calor apresentados pelo autor, são empregados no dimensionamento do trocador de calor geotérmico utilizado nesta dissertação.

2.3 Energia geotérmica para condicionamento de ambientes

Nesta seção são apresentados trabalhos referentes ao uso da energia geotérmica para condicionamento térmico de ambientes. Para aproveitamento geotérmico convencional, diversos autores utilizam a bomba de calor ou circulação de ar forçado para drenar a energia geotérmica do solo. O trabalho desta dissertação se diferencia dos demais por não utilizar a

bomba de calor nem circulação de ar forçado em dutos. As trocas térmicas envolvidas são feitas apenas pela condução de calor entre um líquido circulante e o solo, Este trabalho também adiciona um gerenciamento eletrônico das trocas térmicas envolvidas.

Xia et al. [42] faz comparações entre alguns tipos de trocadores de calor enterrados que utilizam bombeamento de calor. No experimento, os autores investigaram o desempenho de transferência de calor do trocador e fatores que influenciam o seu desempenho, tais como o tipo de trocador de calor, a velocidade da água, temperatura da água de entrada e modo de operação que pode ser contínuo ou intermitente.

Dutra [32] faz uma descrição de como se projetar a capacidade térmica considerando as resistências térmicas do subsolo, espessura da parede da mangueira e água de circulação. Neste trabalho a autora faz uma experimentação simplificada demais e os resultados podem ser melhorados bastante.

Geotics [3] e Williams et al. [9] abordam os intercâmbios da energia geotérmica para condicionamento térmico de uma residência e fazem uma descrição sobre a utilização da energia geotérmica superficial para condicionamento térmico, através do aumento do rendimento de uma bomba de calor. É afirmado que em regiões onde a temperatura média anual se encontra fora do intervalo de temperaturas definidas como conforto térmico humano, se torna obrigatório o uso da bomba de calor, o que aumenta o consumo de energia elétrica do conjunto. O trabalho realizado nesta dissertação tem como objetivo verificar se é possível excluir o uso da bomba de calor e usar apenas a circulação de água para as trocas térmicas.

Diversos autores tais como: Lopes [15]; Tavares [18]; Carvalho [19]; Schulz et al. [20] e Musskopf [21] apresentam trabalhos de condicionamento térmico utilizando tubos enterrados usando convecção natural através de uma chaminé, ou através da circulação de ar forçado. As desvantagens deste tipo de utilização da energia geotérmica superficial estão no fato do ar ser praticamente um isolante térmico, o que exige maior área de troca térmica com o solo, e também o contato direto do ar com fungos ou restos de insetos e animais que podem se instalar dentro do trocador de calor enterrado. Estes contaminantes podem ser transportados pelo próprio ar circulante para o interior da residência, obrigando o uso de filtros, tratamento antibactericida e aumentando o custo.

A Secretaria de Estado de Energia, Independência e Segurança do estado do Maine, *State of Maine (Office of the Governor) - E.U.A.* [26] estima que a energia geotérmica tenha potencial para esquentar e esfriar milhões de casas e empresas em todo o país. Afirma ainda que atualmente nos Estados Unidos a capacidade instalada de energia geotérmica para fins de aquecimento direto totaliza 470 megawatts (MW), ou, o suficiente para aquecer 40.000 casas

de porte médio. O artigo exemplifica diversos métodos para a instalação do trocador de calor geotérmico com ciclo aberto ou fechado. O método que utiliza o laço aberto capta a água do lençol freático em um ponto e o devolve em outro após passar pela bomba de calor. Para o laço fechado são usados exemplos de trocadores de calor enterrados verticalmente ou horizontalmente, ou dentro de lagos ou rios. Todos os métodos utilizam uma bomba de calor para a transferência da energia geotérmica.

O *Natural Resources (Canada's Office of Energy Efficiency)* [27] afirma que o uso da energia geotérmica com bomba de calor naquele país, tem uma eficiência de 2,5 a 3,8. Os resultados desta dissertação apontam para índices maiores de eficiência, atingindo redução de consumo na ordem de 75% ou mais.

2.4 Controle *hill climbing*

Seguel [46] realiza um comparativo entre alguns algoritmos clássicos de controle e foi constatado que os algoritmos do tipo “Perturba e Observa” (HCC) e condutância incremental apresentam eficiência de 99% em todas as condições, verificou também que o software a ser implementado pelo algoritmo HCC é bem mais simples, podendo ser realizado por microcontroladores de baixo custo.

Em Nogushi T. et al. [47] é utilizado um método de controle baseado no algoritmo *Hill Climbing*, utilizando somente um sensor de corrente onde a potência de saída do sistema pode ser estimada com o valor médio e a amplitude de *ripple* da corrente detectada, viabilizando o sistema de controle da planta devido à redução da quantidade de sensores utilizados.

Freitas F. G. et al. [48] afirmam que diversos problemas da Engenharia de Software incluindo a análise de requisitos, a otimização de código, a geração e seleção de casos de teste, entre outros podem ser modelados como problemas de otimização. Como tais, esses problemas podem ser tratados de forma automática através de algoritmos de busca, especialmente os de metaheurísticas. Estas aplicações têm culminado na criação de uma nova e promissora área de pesquisa na computação, chamada de *Search-Based Software Engineering*. Segundo os autores, A técnica de busca *hill-climbing* neste estudo apresentou melhor resultado em comparação a outra técnica puramente randômica, também avaliada.

Para o caso de estudo nesta dissertação, foi escolhido o método heurístico *hill-climbing control*.

2.5 Conversores de corrente contínua para condicionamento geotérmico

O controle *hill climbing* foi usado para maximizar as trocas geotérmicas com o ambiente e também para minimizar o uso e, portanto perdas, da ventilação do trocador de calor dentro do ambiente condicionado. Estes controles foram exercidos através de conversores de potência escolhidos de tal forma a se reduzir ao mínimo qualquer perda neste processo. Para estes controles torna-se necessário a conversão de uma tensão contínua em outra tensão contínua, com valor controlado. Quando se trata de sistemas de corrente alternada a elevação ou redução da tensão é facilmente realizada através de transformadores. Em sistemas CC a situação é diferente e requer o uso de conversores estáticos de potência. Um conversor CC-CC em alta frequência é uma alternativa de elevada eficiência e pouco volume para reduzir a tensão de saída da fonte CC. No condicionamento geotérmico, para controlar a velocidade do fluxo de água nos trocadores de calor e a rotação do ventilador para distribuir o ar arrefecido no ambiente, é feito usando-se tais conversores CC-CC.

Buscando-se a simplicidade, optou-se por considerar as topologias mais comuns de conversores estáticos CC-CC, que são:

- a) conversor abaixador de tensão, também denominado como *step-down* ou *buck*.
- b) conversor elevador de tensão, também conhecido como *step-up* ou *boost*.

Pomilio, J.A. [44] apresenta as estruturas circuitais básicas para fornecer uma tensão variável na saída de um conversor a partir de uma fonte de tensão fixa. Segundo o autor, se a corrente pelo indutor não vai a zero durante a condução do diodo, diz-se que o circuito opera no modo de condução contínua. Caso contrário tem-se o modo descontínuo. Via de regra, prefere-se operar no modo de condução contínua devido a haver neste caso uma relação bem determinada entre a largura de pulso e a tensão média de saída. Com isso, o dimensionamento do conversor *buck* deste trabalho foi feito de modo a operar no modo contínuo.

Rashid M. H. [45] Classifica os conversores CC-CC em dois tipos principais: conversores por modulação de largura de pulso (PWM), e conversores por comutação suave. Segundo o autor, as vantagens dos conversores PWM incluem o uso de poucos componentes, alta eficiência, frequência constante, controle relativamente simples, disponibilidade comercial de componentes e a capacidade de atingir elevadas taxas de conversão tanto para a aplicação de *step-down* como para *step-up*. Uma desvantagem da conversão CC-CC por PWM segundo o autor, é que as formas de onda retangulares da tensão e da corrente causam perdas nos dispositivos semicondutores pelo efeito liga-desliga, o que limita na prática as frequências operacionais na gama de megahertz. Outras formas de onda retangulares

inerentemente geram interferências eletromagnéticas. Assim, optou-se neste trabalho pela conversão CC-CC por PWM.

Martins et al. [35] cita dois inconvenientes ao se conectar a carga diretamente à uma fonte de corrente pulsada:

- a) Produção de poluição radioelétrica devido ao elevado conteúdo de harmônicos;
- b) Se houver indutância em série com a fonte, mesmo que seja parasita, no instante da abertura da chave serão produzidas sobretensões normalmente destrutivas para os semicondutores de potência.

Por estes motivos, nesta dissertação optou-se pelo conversor abaixador conhecido como “*buck*” para controlar a velocidade dos motores CC com filtragem da corrente de carga através de um filtro LC.

2.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram feitas revisões referentes às pesquisas realizadas sobre energia termo solares, comportamento térmico do solo e sobre o uso da EGS para condicionamento térmico de ambientes.

Quanto aos estudos para o condicionamento térmico de ambientes habitados utilizando EGS, observa-se que em muitos casos foram utilizados tubos enterrados com circulação forçada de ar, circulação de ar através de chaminés e trocas térmicas através de bombas de calor. Nos casos de circulação direta de ar forçado e também no uso de chaminés, há a necessidade de filtragem do ar, que pode não ser muito eficiente com relação a fungos e mau cheiro. O que diferencia este estudo em relação aos demais trabalhos realizados, é que nesta dissertação propõe-se o uso de EGS sem o uso do ciclo de Carnot e sem circulação de ar através de tubos. Como consequência, esta dissertação não se utiliza de gases tóxicos no conjunto das bombas de calor, assim como na eliminação da passagem do ar ambiente através de condutos nos quais a inspeção visual se torna difícil ou impossível. O refrigerante utilizado é apenas água, portanto, um processo inodoro, barato, facilmente substituível e sem riscos ambientais. Este trabalho também acrescenta um gerenciamento eletrônico, para a obtenção do ponto de máxima troca térmica com o método heurístico hill-climbing. Em nenhum dos casos estudados anteriormente houve este gerenciamento das trocas térmicas envolvidas, o que proporciona uma considerável redução do consumo de energia elétrica.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECIMENTO DO SOLO

3.1 Introdução

Este capítulo estabelece as bases teóricas que representam a distribuição de temperatura no solo. São apresentadas as equações que governam o processo de difusão do calor no solo e o equacionamento matemático.

3.2 Características térmicas do solo

A fração de radiação solar que é absorvida pelo solo provoca o aquecimento da superfície do mesmo. Este aumento da temperatura dá origem a um gradiente térmico no interior do solo, isto é, a temperatura na superfície é maior do que nas camadas logo abaixo. Em função disso, haverá a transferência de energia da superfície para o interior do solo durante o processo de absorção da radiação solar. As principais características dos solos quanto à distribuição de calor nas camadas abaixo da superfície, estão listadas abaixo.

3.2.1 Capacidade térmica volumétrica

O calor específico volumétrico de uma substância é definido como a quantidade de calor necessário para se elevar de 1 °C a temperatura da unidade de volume desta substância. Como o solo é um elemento composto, formado basicamente por minerais, matéria orgânica, água e gases, a capacidade de aquecimento volumétrico (c_s) do solo pode ser determinada pela soma dos produtos das capacidades térmicas dos elementos que o constituem pela respectiva fração volumétrica. Conforme estudo realizado por (Colabone [34]), o calor específico volumétrico pode ser expresso pela relação:

$$c_s = c_m \times f_m + c_o \times f_o + c_a \times f_a + c_g \times f_g \quad (3.1)$$

onde:

c_s : capacidade de aquecimento volumétrico do solo ($kJ \times m^{-3} \times K^{-1}$);

c_m : calor específico mássico de minerais ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$);

f_m : fração volumétrica de minerais;

c_o : calor específico mássico de matéria orgânica ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$);

f_o : fração volumétrica de matéria orgânica;

c_a : calor específico mássico da água ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$);

f_a : fração volumétrica da água;

c_g : calor específico mássico do ar ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$);

f_g : fração volumétrica do ar.

A tabela 3.1 apresenta os valores típicos dos calores específicos mássicos e das massas específicas dos elementos que constituem o solo, segundo (Prevedello [31]).

Tabela 3.1 - Valores típicos aproximados dos calores específicos mássicos (c) e das massas específicas (ρ) das frações constituintes do solo.

elementos	$c (J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1})$	$\rho (kg \times m^{-3})$
minerais	712	2650
orgânicos	1926	1400
água	4186	1000
ar	1005	1,3

Como a fração gasosa do solo tem massa específica (ρ) insignificante, ainda segundo (Prevedello, [31]), a equação para determinação do calor específico volumétrico do solo fica:

$$c_s = 1,89 \times 10^6 f_m + 2,70 \times 10^6 f_o + 4,19 \times 10^6 f_a \quad (3.2)$$

3.2.2 Condutividade térmica do solo

A condutividade térmica (k) de um solo é o processo de transferência de energia na unidade de tempo por seção transversal unitária, devido a um gradiente de temperatura imposto na direção do fluxo.

A condutividade térmica do solo pode então ser expressa por:

$$k = \frac{\dot{Q} \times \ell}{A \times \Delta T} \quad (3.3)$$

onde:

\dot{Q} : taxa de condução de calor (W ou $J \times s^{-1}$);

A : área da seção transversal (m^2);

ΔT : gradiente de temperatura (K ou $^\circ C$);

ℓ : distância percorrida (m);

k : condutividade térmica ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$).

3.2.3 Difusividade térmica do solo

Em (Çengel [11]), o autor define a difusividade térmica como sendo o quociente do calor conduzido pelo calor armazenado. Então a expressão que define a difusividade térmica (α) do solo é dada por:

$$\alpha = \frac{k}{C_s} \quad (3.4)$$

onde:

α : difusividade térmica ($m^2 \times s^{-1}$);

k : condutividade térmica ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$);

C_s : capacidade de aquecimento volumétrico do solo ($kJ \times m^{-3} \times K^{-1}$).

3.3 Distribuição vertical das temperaturas

A distribuição vertical das temperaturas do solo pode ser estimada pelo método desenvolvido por (Kasuda [8]), que encontrou a temperatura do solo em função do tempo e da profundidade em relação à superfície, que pode ser descrito pela seguinte fórmula:

$$t_{soil(z,t_{year})} = t_{mean} - t_{amp} \times \exp\left(-Z \times \sqrt{\frac{\pi}{365 \times \alpha}}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} \times \left[t_{year} - t_{shift} - \frac{Z}{2} \times \sqrt{\frac{365}{\pi \times \alpha}}\right]\right) \quad (3.5)$$

onde:

$t_{soil(z,t_{year})}$: temperatura do solo na profundidade z em relação ao tempo;

t_{mean} : temperatura média do meio ambiente;

t_{amp} : amplitude da temperatura do meio ambiente [(temperatura máxima - temperatura mínima)/2];

Z : profundidade abaixo da superfície (superfície = 0);

α : difusividade térmica do solo;

t_{year} : tempo atual (dia do ano);

t_{shift} : dia do ano em que ocorreu a mínima temperatura ambiente.

A figura 3.1 apresenta a diminuição exponencial das temperaturas sazonais em função da profundidade do solo. A temperatura média anual na cidade de Santa Maria – RS é de 19,5 °C, conforme consulta feita no banco de dados do (INMET [25]), e este é o valor da equalização das variações sazonais. A partir de 10 metros de profundidade a temperatura permanece praticamente estável neste valor médio.

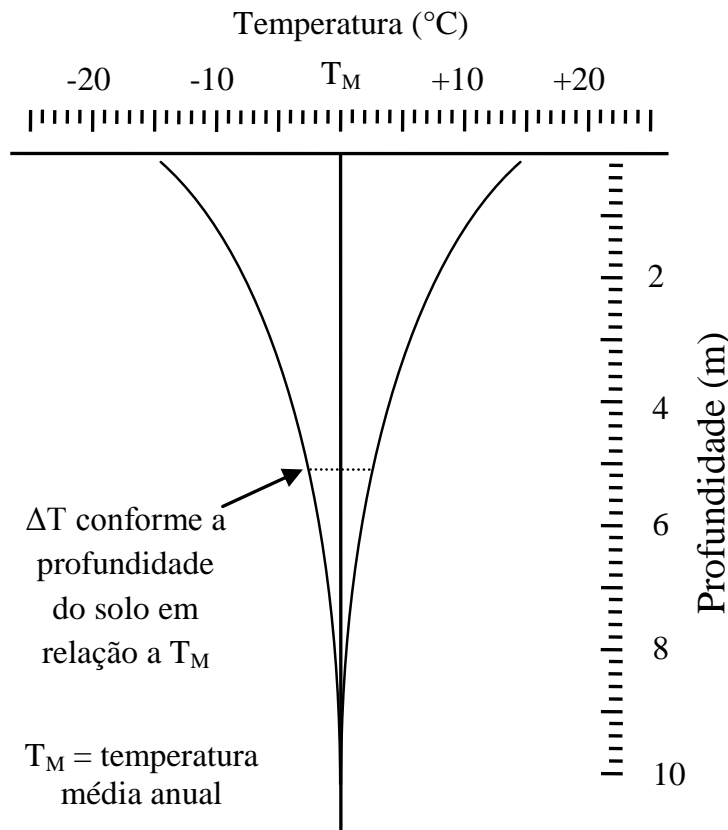


Figura 3.1 - Amplitude das temperaturas sazonais em função da profundidade do solo

3.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo abordou-se o comportamento térmico do solo em função da profundidade. Este estudo aponta ainda as condições de atraso de fase para estimar a profundidade ideal, dependendo de cada caso.

Sabendo-se a temperatura média anual do ambiente, a profundidade, a umidade e o tipo de solo num determinado local, é possível se obter a variação de temperatura e o atraso de fase para cada profundidade. Da mesma forma, a partir da condutividade térmica é possível estimar o trocador de calor geotérmico para extrair a energia necessária para o trabalho proposto.

4 DESCRIÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

4.1 Introdução

Apresenta-se neste capítulo um estudo referente às trocas de calor entre o ambiente condicionado proposto e o subsolo, com o objetivo de se construir um protótipo que consiga absorver ou fornecer calor para o subsolo. É fundamental que se conheçam os tipos de troca de calor que ocorrem no processo e quanto de calor pode ser aproveitado, sem que ocorra saturação no entorno das mangueiras. Neste trabalho são utilizados dois tipos de trocas de calor: por condução e por convecção.

4.1.1 Troca de calor por condução

Troca de calor por condução é a troca de calor que ocorre entre dois materiais sólidos, líquidos e/ou gasosos que estão em contato um com o outro, sem que ocorram movimentações de massa. Para o protótipo montado nesta dissertação, esta troca ocorre entre o solo e as mangueiras.

4.1.2 Troca de calor convectiva

A troca de calor por convecção é a que ocorre entre dois fluídos ou entre um fluído e um material sólido, através do movimento de um material líquido ou gasoso. Para o protótipo montado nesta dissertação, esta troca de calor ocorre entre a água e as mangueiras, entre a água e a superfície do dissipador de calor do ambiente condicionado e entre o dissipador de calor e o ar, uma vez que haja movimentação de água entre estes trocadores de calor e entre o dissipador e o ar ambiente.

4.2 Trocas de calor no subsolo

As trocas de calor no subsolo são formadas por um conjunto de mangueiras enterradas, para esta dissertação foi utilizado uma profundidade de 5 metros para se demonstrar que esta profundidade pode ser suficiente para a maioria das aplicações práticas, por não demandar trabalhos de escavação de maior expressão.

Quanto à seleção das mangueiras, deve ser levado em conta o material usado na sua fabricação, o comprimento, o diâmetro e a espessura da parede. As trocas térmicas são feitas da seguinte maneira: O calor vai da água para a mangueira por convecção e da mangueira para o subsolo por condução.

4.2.1 Condução de calor através de configurações cilíndricas

Considera-se para este estudo um cilindro vazado submetido a uma diferença de temperatura entre a superfície interna e a superfície externa, como o mostrado na figura 4.1. Se a temperatura interna for igual a T_1 e a temperatura externa igual a T_2 , tem-se uma transferência de temperatura por condução.

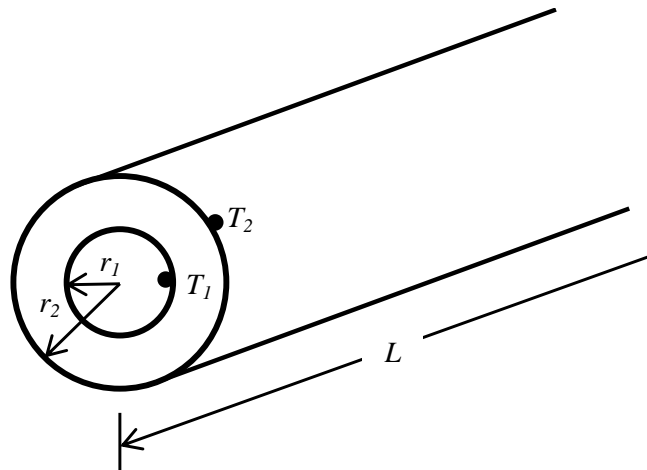


Figura 4.1 - Transferência de calor por condução em tubos

De acordo com (Çengel [11]), o fluxo de calor que atravessa a parede cilíndrica pode ser obtido através da equação de Fourier, ou seja:

$$\dot{Q} = -k \times A \times \frac{dT}{dr} \quad (4.1)$$

Para configurações cilíndricas, a área é uma função do raio:

$$A = 2 \times \pi \times r \times L \quad (4.2)$$

Fazendo a separação de variáveis e integrando entre T_1 em r_1 e T_2 em r_2 , conforme mostrado na figura 4.1, chega-se a:

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{Q} \times \frac{dr}{r} = - \int_{T_1}^{T_2} k \times 2 \times \pi \times L \times dT$$

$$\dot{Q} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -k \times 2 \times \pi \times L \times \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{Q} \times (\ln r|_{r_1}^{r_2}) = -k \times 2 \times \pi \times L \times (T|_{T_1}^{T_2})$$

$$\dot{Q} \times [\ln r_2 - \ln r_1] = -k \times 2 \times \pi \times L \times (T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

Aplicando-se propriedades dos logaritmos, obtém-se:

$$\dot{Q} \times \left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right] = k \times 2 \times \pi \times L \times (T_2 - T_1)$$

o fluxo de calor através de uma parede cilíndrica será então:

$$\dot{Q} = \frac{k \times 2 \times \pi \times L}{\left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \times (T_2 - T_1) \quad (4.4)$$

onde:

$\frac{dT}{dr}$: gradiente de temperatura na direção radial

k : condutividade térmica do material ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$);

\dot{Q} : fluxo de calor (W ou $J \times s^{-1}$);

L : comprimento do tubo (m);

r_1 : raio interno do cilindro (m);

r_2 : raio externo do cilindro (m);

T_1 : temperatura interna do cilindro ($^\circ C$);

T_2 : temperatura externa do cilindro ($^\circ C$).

4.2.2 Resistência térmica na parede cilíndrica

O conceito de resistência térmica dos materiais também pode ser aplicado à parede cilíndrica (*Çengel [11]*). Devido à analogia com a eletricidade, um fluxo de calor na parede cilíndrica também pode ser representado como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (4.5)$$

onde:

ΔT : potencial térmico;

R : resistência térmica da parede;

\dot{Q} : fluxo de calor (W ou $J \times s^{-1}$).

Então para a parede cilíndrica, obtém-se:

$$\dot{Q} = \frac{k \times 2 \times \pi \times L}{\left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \times \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (4.6)$$

Eliminando o ΔT na equação 4, obtém-se a resistência térmica de uma parede cilíndrica:

$$R = \frac{\ln\left[\frac{r_2}{r_1}\right]}{k \times 2 \times \pi \times L} \quad (4.7)$$

4.2.3 Transferência de calor combinado em sistemas radiais

Observa-se na analogia elétrica para o caso de um cilindro oco (por exemplo, um tubo ou um duto) que a troca calor com o subsolo envolve duas resistências por condução (na terra e na parede da mangueira) e uma resistência por convecção (na água), todas ligadas em série. A resistência térmica total ($^{\circ}\text{C} \times \text{W}^{-1}$) é expressa pela soma destas resistências. A figura 4.2 representa esta analogia.

$$R_{total} = R_{\text{água}} + R_{\text{mangueira}} + R_{\text{terra}} \quad (4.8)$$

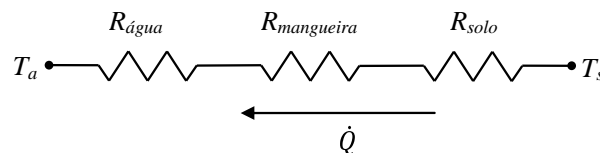


Figura 4.2 - Esquema elétrico equivalente para a troca de calor geotérmica

De acordo com (Çengel [11]), conhecendo-se a resistência expressa pela equação (4.8), a taxa de transferência de calor no subsolo vai ser dada por:

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_s}{R_{total}} \quad (4.9)$$

onde:

T_a : temperatura da água antes de entrar em contato com a terra ($^{\circ}\text{C}$);

T_s : temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$).

Uma resistência térmica na troca de calor por condução pode ser expressa por:

$$R = \frac{1}{S \times k} \quad (4.10)$$

onde:

S : fator de forma de condução (m);

k : condutividade térmica do meio ($\text{W} \times m^{-1} \times ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Para se determinar o fator de forma apresentado na equação (4.10), considera-se somente a troca de calor entre as duas superfícies. Determinar este valor é fundamental para estimar o quanto de calor pode ser transferido do solo. Leva-se em conta o fator de forma na condução da troca de calor com o solo, como se fosse um cilindro isotérmico de comprimento L e diâmetro D_o enterrado em um meio semi-infinito com profundidade z , onde $L \gg D_o$ e $z > 1,5D_o$, como mostra o desenho da figura 4.3. (Çengel [11]) afirma que o fator de forma e a resistência térmica são expressos pelas seguintes equações:

$$S_{solo} = \frac{2 \times \pi \times L}{\ln\left(\frac{4z}{D_o}\right)} \quad (4.14)$$

$$R_{solo} = \frac{\ln\left(\frac{4z}{D_o}\right)}{2 \times \pi \times k_{solo} \times L} \quad (4.15)$$

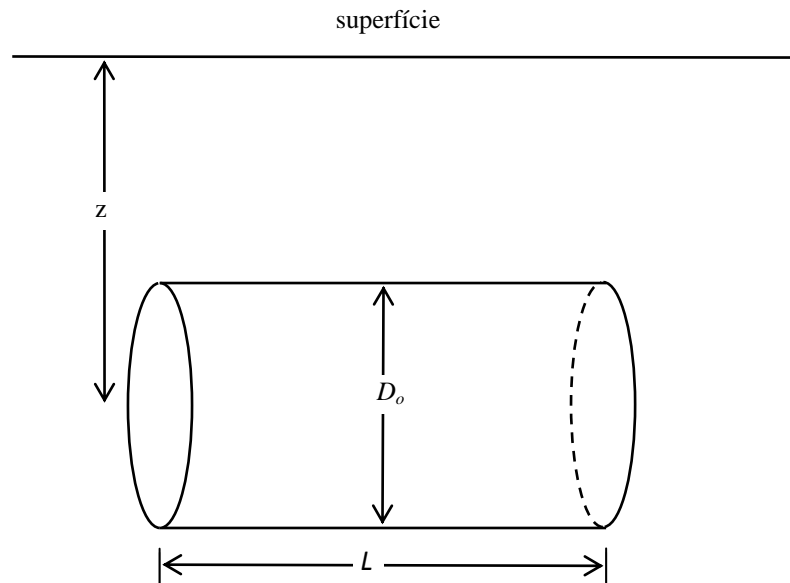


Figura 4.3 - Transferência de calor por condução em um tubo enterrado na profundidade Z

Para determinar o fator de forma e a resistência térmica da parede, deve-se considerar o diâmetro interno D_i e externo D_o da parede da mangueira conforme ilustrado na figura 4.4. De acordo com (Çengel [11]), o fator de forma e a resistência térmica são obtidas respectivamente através das seguintes expressões:

$$S_{parede} = \frac{2 \times \pi \times L}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (4.16)$$

$$R_{parede} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \times \pi \times K_{parede} \times L} \quad (4.17)$$

Para determinar o valor da resistência do fluido, sabe-se que a troca de calor é feita por convecção. Neste caso, onde a troca é por circulação do fluido dentro de um cilindro, há um conjunto de equações para descrevê-la, obtido no estudo realizado por (Dutra [32]).

A resistência térmica do fluido é calculada pela seguinte expressão:

$$R_{fluido} = \frac{1}{h \times A}$$

$$R_{fluido} = \frac{1}{h \times \pi \times D \times L} \quad (4.18)$$

onde:

h : coeficiente de transferência de calor por convecção ($W \times m^{-2} \times ^\circ C^{-1}$);

D : diâmetro da superfície do trocador de calor (m);

L : comprimento do trocador de calor (m).

O coeficiente h e os demais parâmetros que envolvem a troca de calor por convecção podem ser calculados como segue:

$$h = \frac{k_{fluido} \times N_u}{D_i} \quad (4.19)$$

$$N_u = 0,023 \times R_e^{0,8} \times P_r^n \quad (4.20)$$

$$R_e = \frac{V \times D}{\nu} \quad (4.21)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.22)$$

onde:

N_u : número de Nusselt, para escoamento completamente turbulento foi desenvolvido para tubos lisos com $n = 0,4$ para aquecimento e $0,3$ para resfriamento do fluido escoando através do tubo;

R_e : número de Reynolds;

P_r : número de Prandtl;

ν : viscosidade cinemática ($m^2 \times s^{-1}$);

V : velocidade de deslocamento do fluido ($m \times s^{-1}$);

D : é o diâmetro interno do tubo (m);

μ : viscosidade dinâmica ($kg \times m^{-1} \times s^{-1}$);

ρ : densidade do fluido ($kg \times m^{-3}$).

Assim pode-se encontrar a troca de calor no subsolo:

$$R_{total} = \frac{1}{(\pi \times D_o \times L) \times \frac{k_{fluido} \times Nu}{D_i}} + \frac{\ln(\frac{D_o}{D_i})}{2 \times \pi \times L \times K_{parede}} + \frac{\ln(\frac{4z}{D_o})}{2 \times \pi \times k_{solo} \times L} \quad (4.23)$$

O fluxo de calor é dado por:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (4.24)$$

4.3 Trocas de calor na sala protótipo

No protótipo de ambiente usado para os testes práticos desta dissertação utilizou-se um cômodo condicionado pelo trocador de calor geotérmico, o trocador de calor é constituído por duas partes, uma serpentina comercial aletada e construída em cobre e alumínio para uso com gás refrigerante. Ela foi instalada no ambiente condicionado e adaptada para deixar passar um fluxo de água para o subsolo através de uma mangueira de polietileno constituindo a outra parte do ciclo de trocas térmicas.

Assim, no verão e durante o dia, o condicionamento do ambiente funciona conforme descrito a seguir: A casa protótipo absorve calor da radiação solar e do ar através de convecção, cede calor através da serpentina para a água e da água para as mangueiras também por convecção. Por fim, as mangueiras dissipam este calor no solo por condução.

No caso do inverno, o ciclo funciona de maneira inversa, retirando calor do solo e disponibilizando-o para o ambiente a ser condicionado. O trocador de calor instalado para condicionar a sala de teste tem uma área de troca de 0,578 m x 0,352 m perfazendo uma área total de 0,2035 m². Para medir a capacidade de troca térmica deste dispositivo seguiram-se os seguintes passos:

- a) Foi ligado na sala um aquecedor elétrico com 2,187 kW de potência;
- b) Foi medida a temperatura do fluxo de ar, a cada 2 minutos e 30 segundos. Na saída do trocador de calor foi usado um termômetro CEM DT-8880 e na entrada do trocador de calor um sensor DS 18B20, a tabela 4.1 mostra as temperaturas lidas;
- c) Com um anemômetro Davis - LCA6000 foi medido a velocidade do ar que atravessa o trocador de calor em diversos pontos, obtendo-se uma média de $70,2 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ (Ver tabela 4.2).

Tabela 4.1 - Temperatura do fluxo de ar na entrada e na saída no trocador de calor

Tempo (min)	Saída (°C)	Entrada (°C)
0:00	21,90	28,60
2:30	21,80	28,06
5:00	21,80	28,12
7:30	21,00	27,9
10:00	20,60	28,06
12:30	20,10	28,54
15:00	20,00	28,30
17:30	21,90	28,54
20:00	21,50	28,72
22:30	21,40	28,42
25:00	21,20	28,33

- d) Com auxílio de dois termômetros, mediram-se as temperaturas na entrada do fluxo de ar e após a passagem pelo trocador de calor, obtendo-se, com a média aritmética de dez medidas, os seguintes valores:

$$T_e = 28,326 \text{ °C}$$

$$T_s = 21,200 \text{ °C}$$

onde:

T_e : temperatura na entrada do fluxo de ar (°C);

T_s : temperatura após a passagem pelo trocador de calor (°C).

Tabela 4.2 - Fluxo de ar no trocador de calor

Velocidade do ar ($m \times min^{-1}$)
31,09
24,69
64,01
59,13
144,47
130,45
99,97
123,14
26,52
24,69
27,74
30,17
147,83
57,61
62,79

Segundo (Creder [33]), o calor específico (c) do ar a temperatura ambiente é:

$$c = 0,24 \times kcal \times kg^{-1} \times K^{-1}$$

A vazão mássica do ar (\dot{m}) pelo trocador de calor foi estimada em $1020,27 kg/h$. A equação da quantidade de calor gerado derivada em relação ao tempo é:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c \times \Delta T$$

onde:

\dot{Q} : taxa de transferência de calor ($kcal \times h^{-1}$);

\dot{m} : vazão mássica do ar ($kg \times h^{-1}$);

c : calor específico ($J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$).

Substituindo os valores de vazão mássica e do calor específico para a variação da temperatura ΔT dada pela diferença entre as temperaturas de saída e entrada na mangueira, respectivamente, obtém-se:

$$\dot{Q} = 1744,906 \text{ kcal/h}$$

A foto ilustrativa dos equipamentos utilizados para se obter estes dados, pode ser vista na figura 4.4.



Figura 4.4 - Anemômetro DAVIS LCA6000 e termômetro CEM DT-8880

4.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as diversas formas de troca de calor e as equações envolvidas neste estudo. Foi possível verificar que as trocas de calor deste protótipo ocorrem entre o solo e as mangueiras por condução, entre a água e a mangueira por convecção e entre o trocador de calor da sala de teste e a água de circulação por convecção.

Observou-se que as trocas de calor envolvendo o solo são bastante complexas, exigindo uma análise cuidadosa para que o trocador de calor enterrado seja dimensionado adequadamente. O conjunto de trocas térmicas formado pode ser abordado considerando o seu equivalente elétrico, onde a taxa de transferência de calor pode ser obtida pela diferença de temperatura dividida pela resistência térmica total. Nesta representação, devem-se levar em conta as resistências da terra e da parede da mangueira e da água, sendo que a troca de calor para os dois primeiros casos é feita por condução, para a qual se deve determinar o fator de forma. Já para a água, deve-se obter o coeficiente de transferência de calor por convecção h .

A determinação destas taxas de transferência de calor é fundamental para estimar corretamente os componentes dos trocadores de calor, para se projetar um protótipo de ambiente como o apresentado no capítulo 5.

5 IMPLANTAÇÃO PRÁTICA

5.1 Introdução

Este capítulo descreve o projeto e a implantação dos diversos dispositivos que compõem o sistema de condicionamento térmico através do aproveitamento da EGS. Também descreve o dispositivo de controle do ar condicionado na sala de referência para fins comparativos. O condicionamento geotérmico é composto pelos trocadores de calor no ambiente a ser condicionado e no subsolo, por uma mangueira que forma um circuito fechado entre os trocadores de calor, pela bomba hidráulica responsável pela circulação de água ao longo do circuito e por um ventilador responsável pela circulação do ar. O diagrama de blocos apresentado na figura 5.1 ilustra o circuito de transferência térmica deste esquema, onde o calor absorvido do subsolo pelo trocador de calor geotérmico é transferido para o ambiente a ser condicionado por circulação forçada de água na bomba hidráulica. Em seguida, o calor trocado no ambiente volta para o trocador de calor geotérmico, fechando o ciclo.

A figura 5.2 apresenta a foto da casa onde está instalado o protótipo deste trabalho e a figura 5.3 apresenta a planta baixa da mesma.

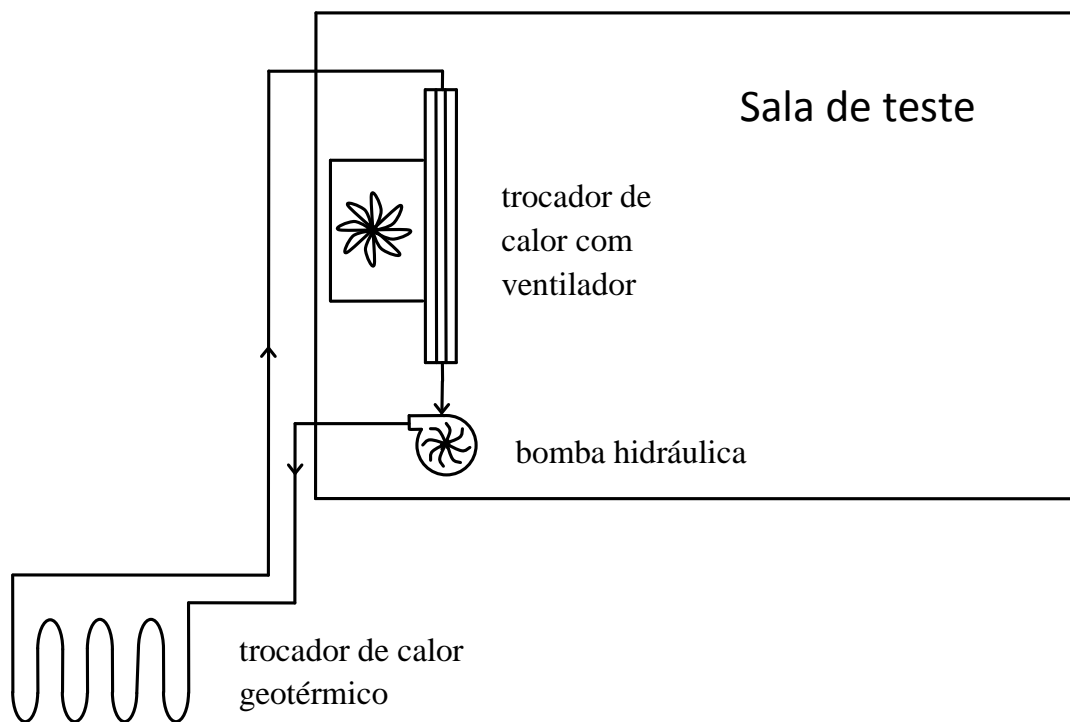


Figura 5.1 – Esquema do sistema de transferência térmica

Este capítulo apresenta também uma análise de viabilidade técnica e energética para implantação do condicionamento geotérmico em diversas regiões do país. Também contém a descrição do circuito de controle do ar condicionado e o projeto do condicionador geotérmico, com os respectivos monitoramentos dos consumos de energia elétrica. Após está descrito o controle *hill climbing* (HCC) com passo fixo para rastreamento do ponto de máxima troca térmica, juntamente com o fluxograma de funcionamento. O controle HCC com passo fixo foi utilizado pela simplicidade de implantação e pelo fato de que as trocas térmicas oscilam em torno do ponto ótimo. Na sequência, um conversor CC-CC (*buck*) foi utilizado para reduzir a tensão, devido a sua estabilidade e eficiência elevada. Incluiu-se também uma descrição do sistema de aquisição de dados e os detalhes construtivos referentes a este circuito que estão apresentados no Apêndice B.

Para encerrar este capítulo, foi feita uma análise de viabilidade técnica do uso do condicionamento geotérmico em diversas regiões, com o objetivo de se verificar o custo benefício do seu uso.



Figura 5.2 - Foto da casa protótipo

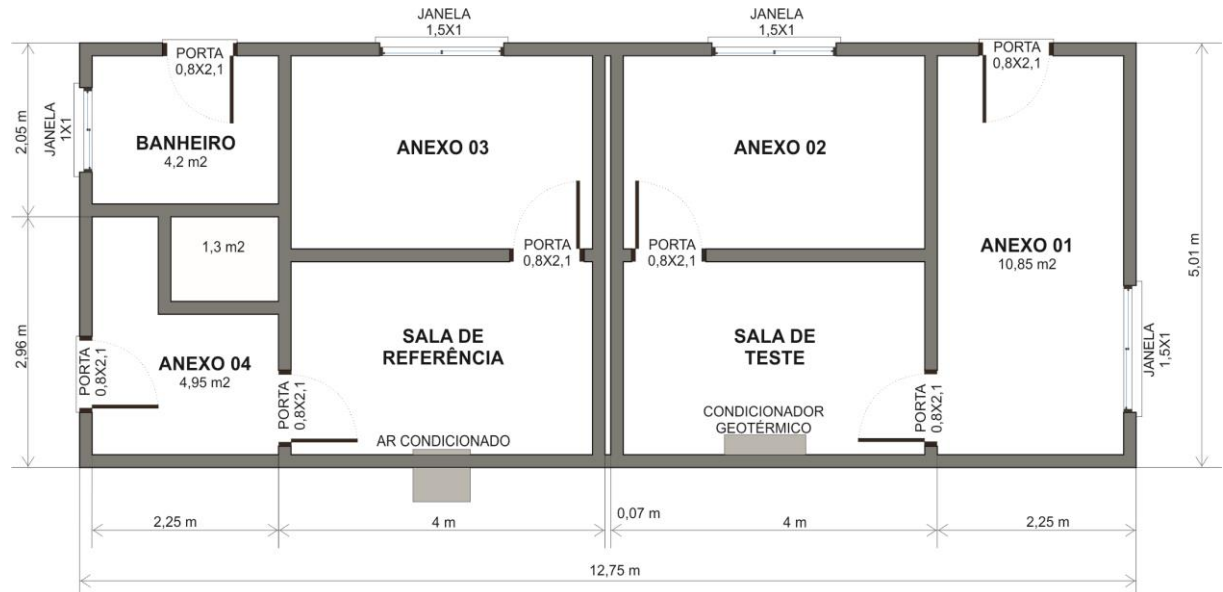


Figura 5.3 - Planta baixa

5.2 Controle e monitoramento do ar condicionado

O controle do ar condicionado foi implantado com o objetivo de se obter na sala de referência a mesma temperatura da sala com condicionamento geotérmico, bem como para monitorar e armazenar o consumo de energia elétrica deste procedimento. Ambas as salas possuem posição geográfica e orientação solar idêntica. O diagrama de blocos da figura 5.4 ilustra o esquema elétrico do controle do ar condicionado e da aquisição de dados do seu consumo de energia elétrica e temperaturas.

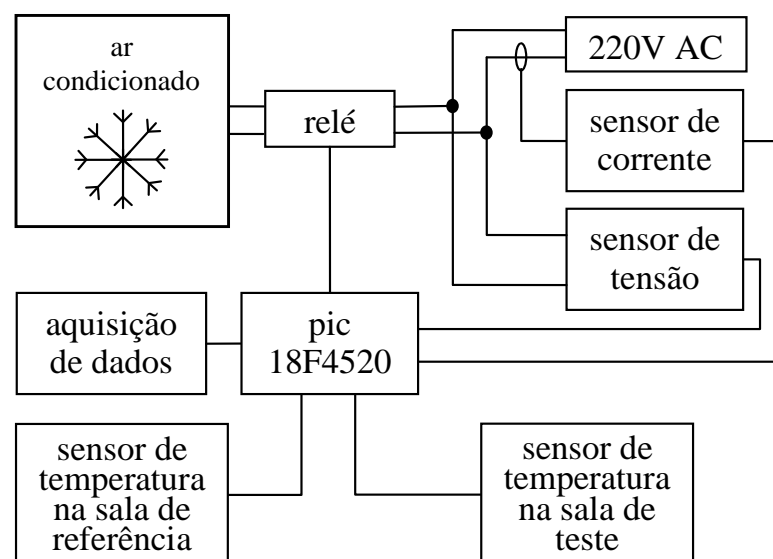


Figura 5.4 - Controle do condicionador de ar

O controle de temperatura nos ambientes condicionado e no de referência, usa um programa de controle que verifica se a temperatura na sala de referência está abaixo de 17 °C ou acima de 24 °C. Caso positivo, para o período de inverno, o ar condicionado é ligado quando a temperatura atinge 0,25 °C abaixo da temperatura da sala com condicionamento geotérmico e desliga quando atinge 0,25 °C acima. Para o caso do verão, o controlador liga o ar condicionado quando a temperatura da sala de referência atinge 0,25 °C acima da temperatura da sala com condicionamento geotérmico e desliga quando atinge 0,25 °C abaixo. O microcontrolador também monitora os valores de tensão e corrente elétrica do consumo do ar condicionado e os armazena em um cartão de memória do tipo SD.

O fluxograma do controle do ar condicionado está representado na figura 5.5. Mais detalhes a respeito do circuito de controle estão no Apêndice A.

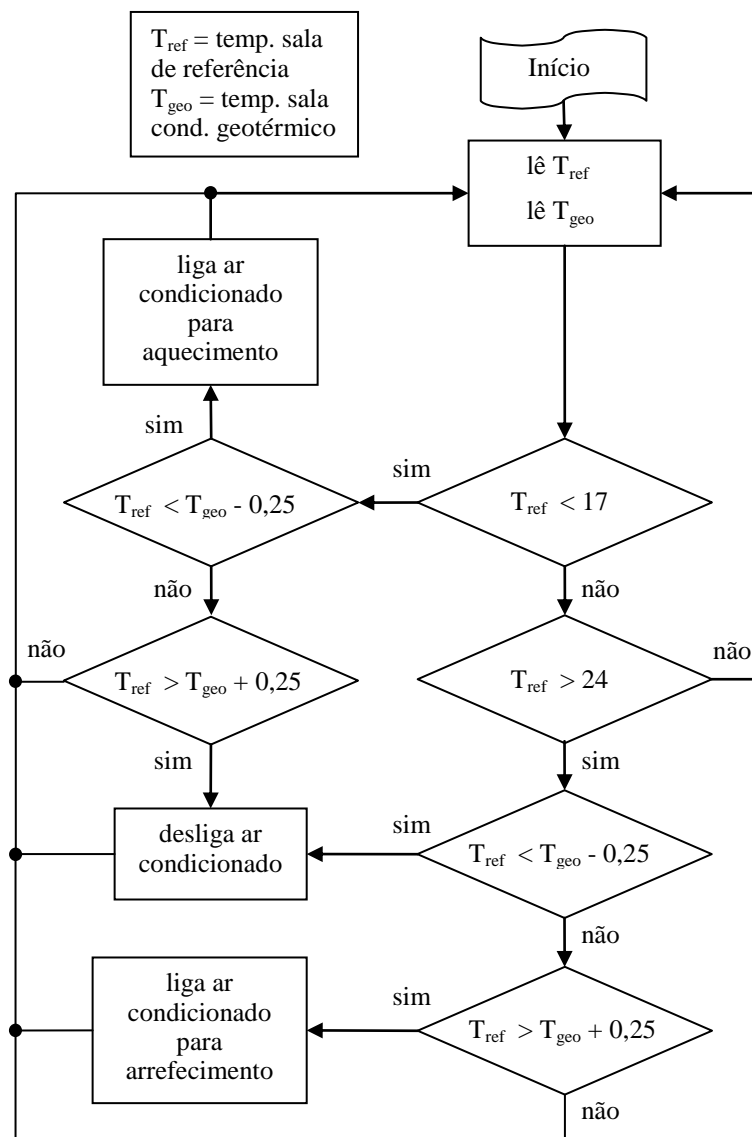


Figura 5.5 - Fluxograma do controle do ar condicionado

5.3 Controle *hill climbing*

O controle é do tipo escalada de colina (*hill climbing control* - HCC) e se caracteriza por medições sucessivas da temperatura do fluxo de ar no trocador de calor e no ambiente condicionado. Para o gerenciamento eletrônico, o microcontrolador verifica se o aumento do fluxo do líquido refrigerante provoca aumento da temperatura do fluxo de ar, e, se este aumento é mais significativo em relação ao passo anterior. Caso contrário, refaz a busca com o objetivo de obter o ponto de máxima troca térmica. O ciclo de trabalho do conversor CC-CC é incrementado ou decrementado (ΔW), dependendo do aumento ou redução da temperatura do fluxo de ar. Por exemplo, para o caso de inverno, se a condição da medição atual é de incremento do ciclo de trabalho e a temperatura medida é maior do que a medição anterior, então é feito um novo incremento no ciclo de trabalho e permanece nesta situação de incremento até que este procedimento provoque diminuição de temperatura, ou, permaneça no mesmo valor do passo anterior. Neste ponto, é realizado um decremento, e permanece em decremento se a temperatura medida é maior do que a anterior. Este procedimento é demonstrado na figura 5.6 para o passo fixo cuja escolha se deve a facilidade de implantação e pela pequena variação do ciclo de trabalho que oscila em torno do ponto de máxima troca térmica. Esta oscilação não influi negativamente nas trocas térmicas envolvidas neste trabalho. As escolhas dos ciclos de trabalho foram feitas para se ter pouca oscilação em torno do ponto ótimo, ao mesmo tempo em que diminui os erros causados por variações de temperatura e do conversor CC-CC.

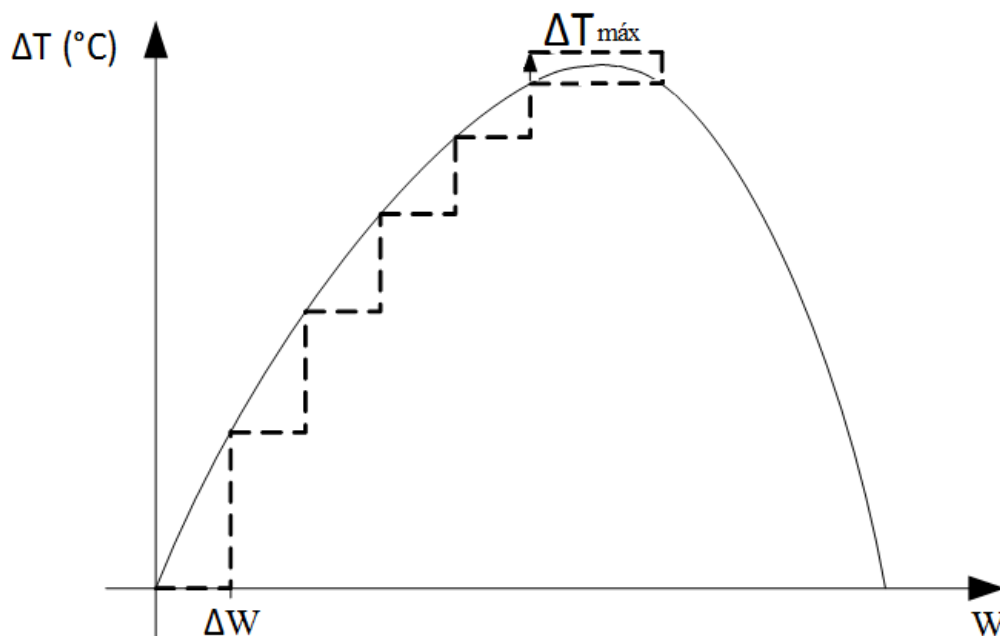


Figura 5.6 - Representação teórica do algoritmo HCC

5.4 Controle e monitoramento do condicionador geotérmico

O controle do condicionador geotérmico é o elemento mais importante deste trabalho. Sem o método heurístico HCC para gerenciar as trocas térmicas envolvidas nesta dissertação o condicionamento geotérmico não se torna eficiente, como mostram os testes realizados durante o ano de 2013 e apresentados no capítulo 6. Sem um controle eletrônico consome-se em excesso a energia elétrica durante os períodos em que não há necessidade de condicionamento, bem como as trocas térmicas não ocorrem da melhor maneira possível. No caso da bomba hidráulica ser alimentada com a máxima potência, o fluido teria uma velocidade muito alta e percorreria todas as mangueiras sem que houvesse uma troca térmica eficiente com o subsolo. Deve-se isto ao fato de o solo ter uma resistividade térmica alta se comparado com o polietileno e a água. Neste caso, o fluido retorna para a superfície com uma temperatura superior à temperatura do solo. Caso contrário, se a bomba hidráulica for alimentada com uma potência elétrica menor do que o necessário, então ocorre troca térmica total do fluido com o solo, mas não haveria vazão mássica suficiente do fluido para que a transferência térmica convectiva supra a carga térmica exigida, e por consequência não refrigera a contento a sala de testes. Portanto, existe uma velocidade ideal de fluxo da água nas mangueiras que atenda tanto a troca de calor com o solo quanto à troca com o ambiente a ser condicionado, justificando o uso do controle eletrônico HCC. Além do mais o equacionamento dos fenômenos envolvidos seria improdutivo devido às alterações que ocorrem no solo (umidade e constituição), no ambiente condicionado (movimentação de equipamentos e de pessoas) e no ambiente externo (insolação, frio, chuva, ventos, etc.).

Para controlar a temperatura dentro da faixa dos valores pré-determinados pelo HCC, foi utilizado um microcontrolador PIC 16F877A em conjunto com dois sensores de temperatura DS18B20. Um sensor monitora a temperatura ambiente na sala de testes e o outro a temperatura do fluxo de ar no trocador de calor instalado na sala de testes. O microcontrolador compara o valor da temperatura do ar que sai do trocador de calor com a leitura anterior, e também lê o valor da temperatura da sala. Com estas informações executa o algoritmo HCC. Após executar o algoritmo de controle, o microcontrolador gerencia o fluxo de água na bomba hidráulica e o fluxo de ar no ventilador com o auxílio de dois conversores CC-CC do tipo redutor de tensão (*buck*).

Para valores de temperatura entre 17 °C e 24 °C, o condicionamento da sala de teste permanece inoperante. O diagrama de blocos do circuito de controle do condicionador geotérmico está apresentado na figura 5.7, juntamente com o circuito de aquisição de dados.

Detalhes construtivos do circuito de controle através do método HCC, estão no Apêndice A. Especificações do DS 18B20 são apresentadas no Anexo III.

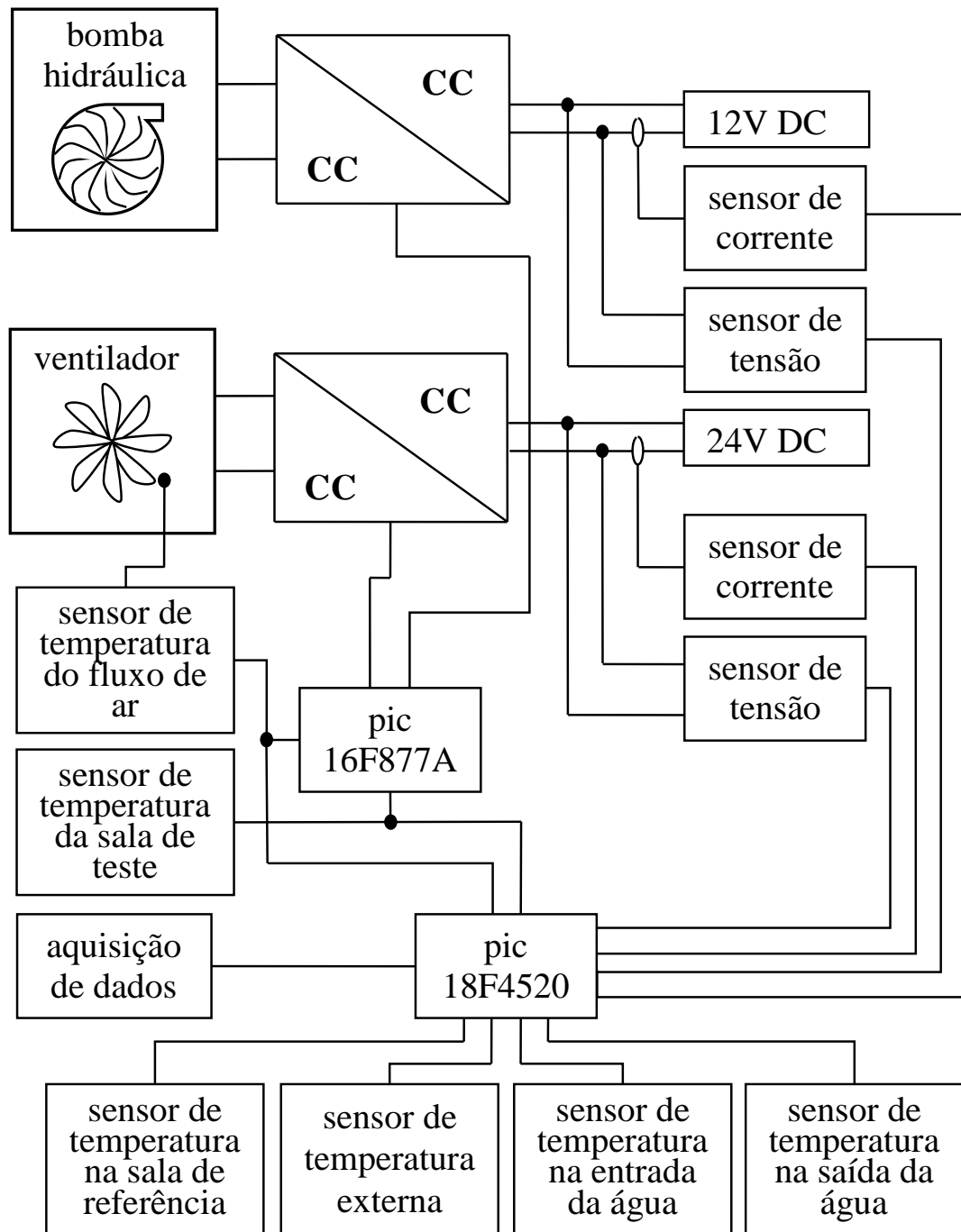


Figura 5.7 - Controle do condicionador geotérmico e aquisição de dados

A figura 5.8 apresenta o fluxograma do controlador HCC. O código fonte para este programa está apresentado no Apêndice A, implementado no microcontrolador PIC 16F877A cujas especificações são apresentadas no Anexo I.

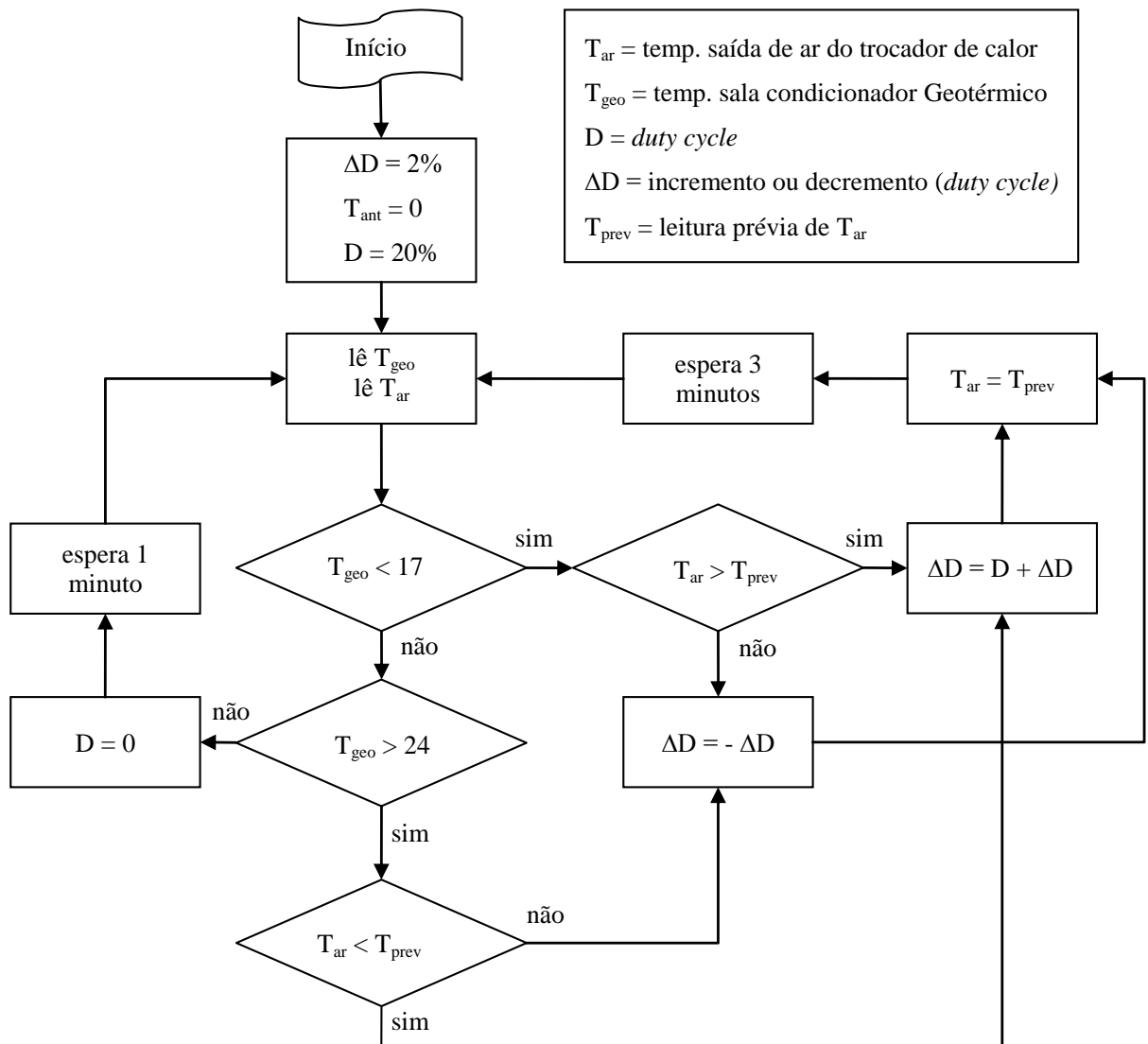


Figura 5.8 - Fluxograma do controle HCC do condicionador geotérmico

5.5 Aquisição de dados

Como a variação das temperaturas no ambiente são lentas, para economizar memória de armazenamento de dados optou-se pelo armazenamento dos dados a cada 5 minutos, de modo que os dados medidos são armazenados em arquivos com formato txt criados no cartão SD. O circuito é formado por um RTC do tipo PCF 8583. Este componente cria um calendário com relógio, necessário para o microcontrolador PIC 18F4520 organizar os dados em pastas separadas por dia, mês e ano. Dentro de cada pasta, os dados são organizados a cada leitura por horário. A placa de aquisição de dados possui também 8 portas de entrada ou saída de dados, sendo que 6 delas foram usadas como entrada analógica de dados para capturar dados de corrente e tensão dos dispositivos usados neste experimento, O controlador possui também um display LCD que informa em tempo real os valores lidos. A figura 5.9

ilustra o fluxograma de funcionamento do circuito de aquisição de dados. Mais detalhes sobre a placa de aquisição de dados são apresentados no Apêndice B. Especificações do PIC 18F4520 são apresentadas no Anexo II.

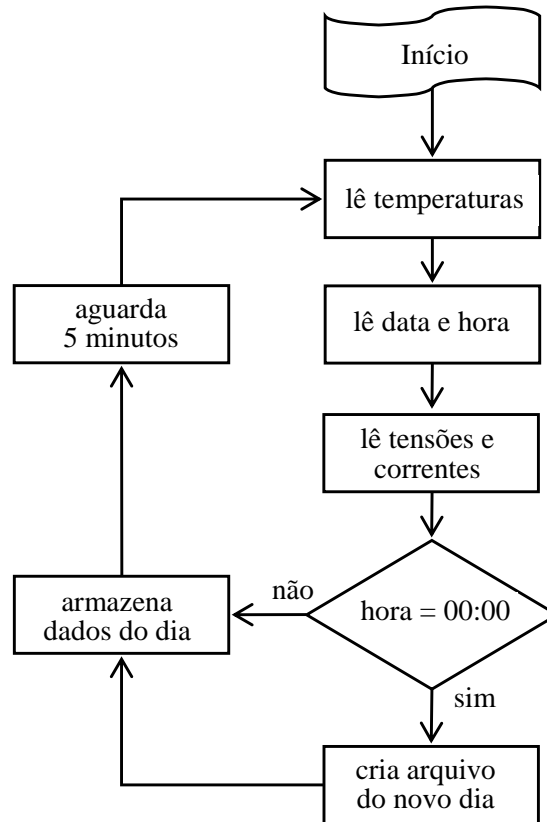


Figura 5.9 - Fluxograma da aquisição de dados

5.6 Conversor CC-CC

Foi utilizado um conversor de corrente contínua (CC-CC) para regular a carga elétrica da bomba hidráulica e do ventilador. A regulação da vazão do fluido refrigerante e do fluxo de ar é feita pela modulação em largura de pulsos (*pulse width modulation - PWM*). Para esta dissertação foi escolhido o conversor *buck* (abaixador de tensão). A razão principal para esta escolha é a sua estabilidade comparada a outros conversores e por ser um conversor não isolado, simplificando o projeto e a implantação como um todo. A figura 5.10 mostra o circuito utilizado no experimento onde se pode observar que o chaveamento é feito através de um MOSFET. Um dos seus terminais está ligado à terra do circuito ao invés da tensão de entrada, facilitando a implantação do controle que é ligado ao terminal de gatilho do MOSFET.

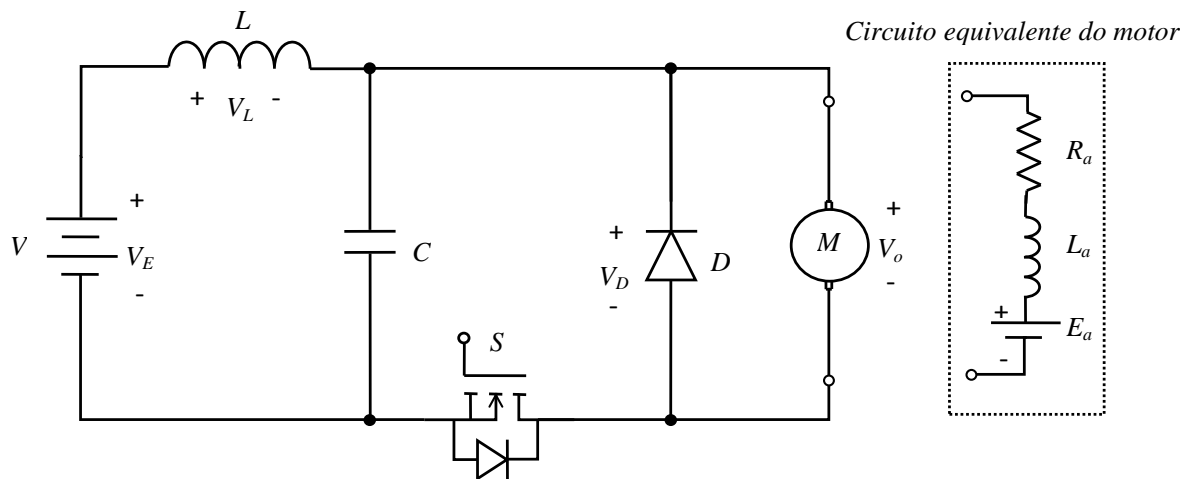


Figura 5.10 - Circuito *buck* utilizado

onde:

V_E : tensão da fonte (V);

V_o : tensão no motor (V);

R_a : resistência da armadura (Ω);

L_a : indutância da armadura (H);

E_a : tensão induzida (V);

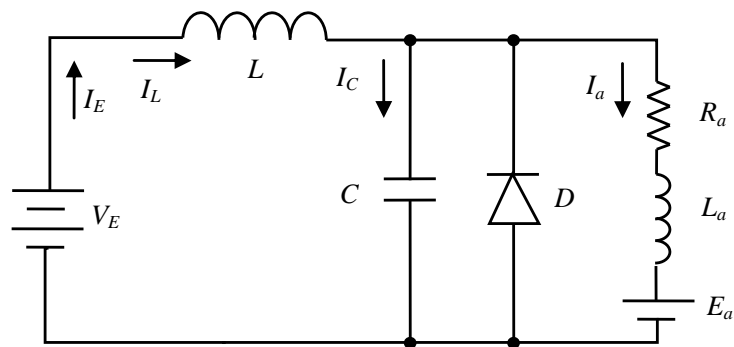
M : motor CC;

S : chave eletrônica;

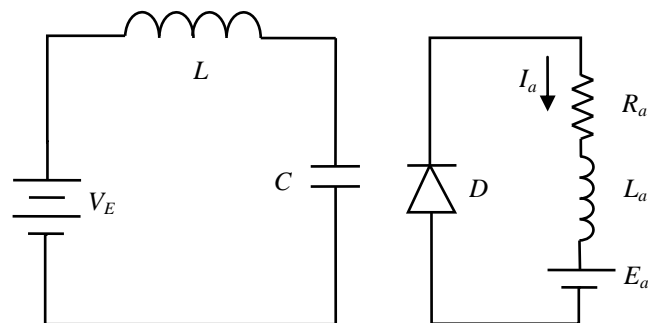
D : diodo em anti-paralelo.

O conversor abaixador, também conhecido como “*buck*”, produz uma tensão na saída que varia de 0 a 100% da tensão de entrada, e é usado principalmente no controle de velocidade de motores CC. Analisando a figura 5.10, observam-se duas etapas de funcionamento. Na primeira etapa, quando a chave S se encontra fechada, a corrente de carga circula pela fonte V . Na segunda etapa, Quando a chave S está aberta, a corrente de carga flui pelo diodo de roda-livre D . A ausência do diodo provocaria tensões que destruiriam a chave S durante a transição dos dois estados de funcionamento.

Os circuitos equivalentes para os ciclos de operação do conversor *buck*, está apresentado na figura 5.11.



(a)



(b)

Figura 5.11 - (a) ciclo com a chave fechada; (b) chave aberta

O próximo passo foi projetar o conversor *buck* considerando os dados da carga utilizada, considerando-se que a corrente na carga não deva cair até zero durante a condução do diodo. Então, a relação entre as tensões de entrada V_i e de saída V_o é expressa por:

$$w = t_s \cdot f = \frac{V_M}{V_E} \quad (5.1)$$

onde:

w : ciclo de trabalho;

t_s : tempo de condução da chave S (s);

f : frequência do chaveamento (Hz);

V_o : Tensão no motor (V);

V_E : Tensão da fonte (V).

Conforme a equação (5.1) e o circuito apresentado na figura 5.10, e de acordo com (Martins *et al.* [35]), o valor do capacitor C pode ser calculado por:

$$C = \frac{I_o}{4 \times f \times \Delta V_{Cmax}} \quad (5.2)$$

e o indutor L pode ser calculado por:

$$L = \frac{I_o}{31 \times f^2 \times C \times \Delta I_{Emax}} \quad (5.3)$$

onde:

ΔV_{Cmax} : ondulação máxima pico-a-pico da tensão no capacitor C ;

I_o : corrente média do motor;

f : frequência de chaveamento;

ΔI_{Emax} : ondulação máxima pico-a-pico da corrente no indutor L .

A frequência de trabalho foi de 10 kHz devido a limitações do microcontrolador utilizado, que permite no máximo este valor para a saída do sinal de PWM.

Os parâmetros calculados para este projeto são apresentados na tabela 5.1.

Detalhes referentes ao conversor CC-CC com o circuito prático utilizado são mostrados no Apêndice A. Especificações da bomba hidráulica são apresentadas no Anexo IV e as especificações do ventilador são apresentadas no anexo V.

Tabela 5.1 - Parâmetros calculados e utilizados para o projeto do conversor *buck*

Parâmetro	Calculado	Utilizado
L (mH)	2,1	2
C (μ F)	25,8	25

5.7 Cargas térmicas das salas

As cargas térmicas das salas de teste e de referência foram obtidas com a ajuda do software *Carrier's HAP (Hourly Analysis Program)*, que é uma ferramenta usada por profissionais que trabalham com HVAC (*heating, ventilating and air conditioning*). Detalhes do levantamento térmico podem ser visto no Apêndice E.

Observa-se que o software encontrou uma carga térmica de 0,3 kW para calefação e 0,8 kW para arrefecimento na sala com condicionamento geotérmico. Para a sala de referência a carga térmica é de 0,3 kW para calefação, mas 0,7 kW para arrefecimento. Existe uma pequena diferença de carga térmica entre as salas para arrefecimento, devido a detalhes construtivos. Mas sem impossibilitar a realização do experimento.

5.8 Trocadores de calor

Os trocadores de calor utilizados foram projetados, primeiro considerando os cálculos referentes à carga térmica da sala de teste, e, em seguida, levando em conta às trocas de calor apresentadas no capítulo 4. Foi feito um dimensionamento dos materiais que compõem este protótipo na condição de que o subsolo tenha capacidade de suprir a carga térmica em questão. O trocador de calor com o solo não pode ter dimensões inferiores às necessárias para suprir a carga térmica porque a temperatura do solo e a temperatura de conforto térmico estão muito próximas, e não há margem para saturação neste sistema.

5.8.1 Trocador de calor geotérmico

A instalação do trocador de calor geotérmico foi feita por um conjunto com 4 mangueiras em série, com uma polegada de diâmetro e 100 m de comprimento cada uma. Cada mangueira formou um trocador de calor com 15 m de comprimento e 1 m de largura, As mangueiras foram enterradas sobrepostas em uma vala de 5 m de profundidade, ficando enterradas com 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m e 5 m respectivamente, conforme ilustram a figura 5.12 e 5.13. A ligação em série das mangueiras ocorreu na superfície para evitar problemas de vazamentos e para facilitar a manutenção.

Para evitar que as extremidades das mangueiras tocassem o solo no retorno à superfície e com isso perdesse calor para as camadas superiores do solo, foi adicionado um tubo de PVC de 50 mm envolvendo as mangueiras até a profundidade aonde ocorrem as trocas térmicas, como pode ser observado na figura 5.14.



Figura 5.12 - Detalhe da mangueira enterrada a 5 metros de profundidade



Figura 5.13 - Detalhe da mangueira enterrada a 3,5 metros de profundidade



Figura 5.14 - Detalhe da entrada das mangueiras e isolamento térmico em PVC

Com base no equacionamento do capítulo 4 e considerando as propriedades da água, contidas no Anexo VII e as propriedades do solo e da mangueira apresentadas na tabela do Anexo VIII fornecida por (*PROTOLAB [37]*), é possível estimar o comprimento mínimo necessário das mangueiras a serem enterradas no subsolo como segue.

Considerando-se a temperatura da água de 19,5 °C e a diferença de temperatura da troca igual a 2,5 °C entre a temperatura do solo e a temperatura do ambiente e uma carga térmica de 800 W conforme a figura 5.10, substitui-se a equação (4.23) na equação (4.5) para se obter o comprimento mínimo necessário que são 400 m de mangueiras no trocador de calor geotérmico. A tabela 5.2 apresenta os resultados coletados destas estimativas.

Recomenda-se a instalação de mangueiras com comprimento maior do que o calculado para evitar a saturação do solo. Para os testes práticos foi utilizada uma mangueira com 300 m de comprimento, a razão de se usar um comprimento inferior ao estimado se deu pelo fato de que a mangueira enterrada a 1,5 m de profundidade foi inutilizada durante a instalação, porque ficou obstruída por esmagamento.

A disposição das mangueiras no solo foi montada na forma de espiras dispostas de modo horizontal com aproximadamente 1 m de diâmetro. Foram feitas amarrações com fita plástica visando manter o arranjo uniforme e rígido, o que facilita a colocação do conjunto no solo. Os detalhes da armação das espiras da mangueira são apresentados na figura 5.15.



Figura 5.15 - Detalhe da amarração das espiras das mangueiras

Tabela 5.2 - Dimensionamento do trocador de calor geotérmico

Parâmetro	Valor
\dot{Q} (W)	800
Z (m)	5
D_o (m)	0,0245
D_i (m)	0,0214
$K_{\text{água}}$ ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)	0,58
K_{solo} ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)	1
$K_{\text{polietileno}}$ ($W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$)	0,17
μ ($kg \times m^{-1} \times s^{-1}$)	$8,11 \times 10^{-4}$
ρ ($kg \times m^{-3}$)	996
ν ($m^2 \times s^{-1}$)	$8,14 \times 10^{-7}$
V ($m \times s^{-1}$)	0,01
Re	442,2
Pr	5,6
h ($W \times m^{-2} \times ^\circ C^{-1}$)	51,5
ΔT ($^\circ C$)	2,5
L (m)	402

A figura 5.16 ilustra a instalação das mangueiras do condicionador geotérmico e a figura 5.17 ilustra as instalações dos equipamentos envolvidos nesta dissertação e dos respectivos sensores de temperatura.

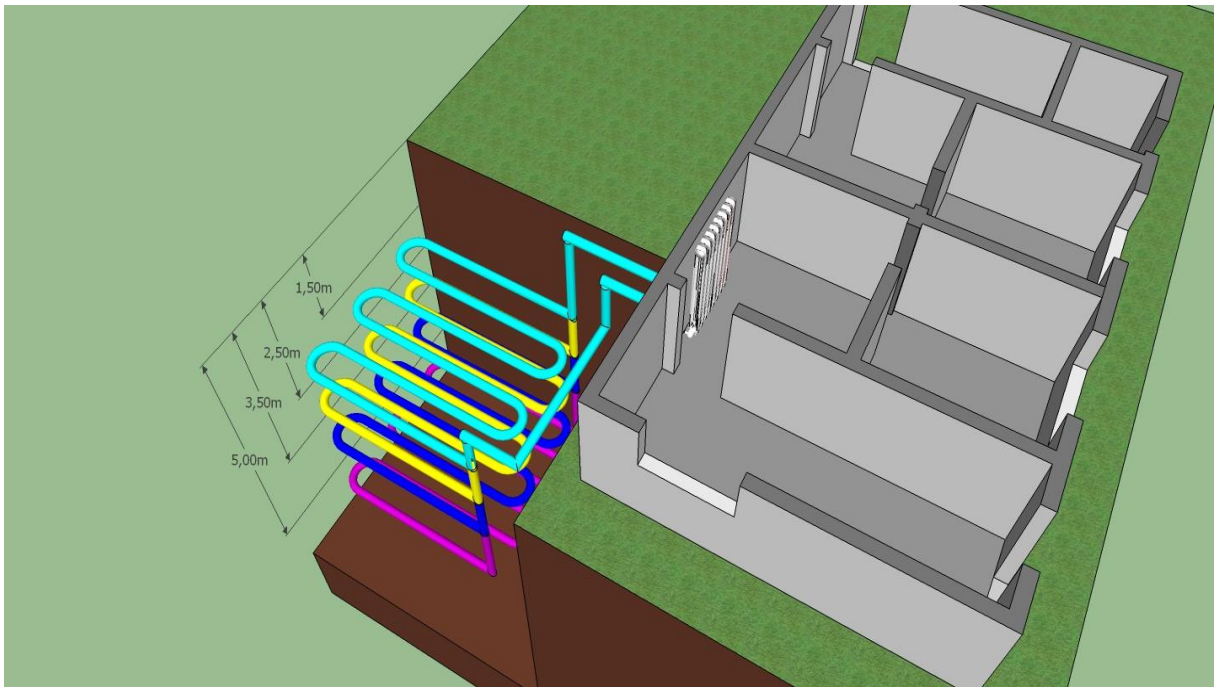
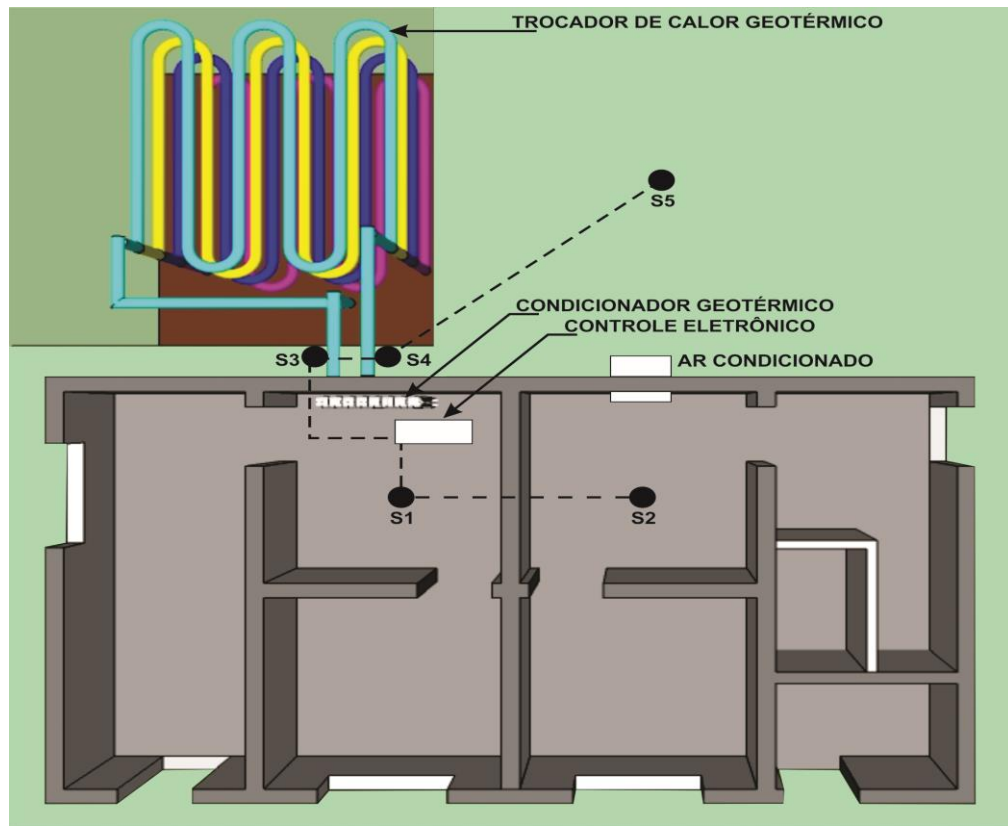


Figura 5.16 - Detalhe ilustrativo da localização do condicionador geotérmico



● SENSOR DE TEMPERATURA

S1 - SALA DE TESTE S2 - SALA DE REFERÊNCIA S3 - SAÍDA DE ÁGUA DO SOLO
S4 - RETORNO DA ÁGUA PARA O SOLO S5 - TEMPERATURA EXTERNA

Figura 5.17 - Vista superior dos equipamentos e sensores instalados

5.9 Análise de viabilidade

O condicionamento geotérmico para ser viável depende necessariamente das oscilações sazonais de temperatura na localidade onde se pretende instalá-lo. Numa região onde a temperatura fosse praticamente constante durante todo o ano, seria inútil o aproveitamento da energia geotérmica. No deserto do Saara, por exemplo, as temperaturas oscilam de 40 °C a 50 °C durante o dia para até -5 °C durante a noite, com uma temperatura média em torno de 25 °C. Neste caso com tais variações acentuadas de temperatura durante um dia, seria possível um condicionamento geotérmico entre 22 °C durante a noite e 28 °C durante o dia, pois esta temperatura acumulada no subsolo é a que se aproxima da temperatura média no local. No deserto de Atacama, a temperatura oscila entre 10 °C e 40 °C, resultando também numa média de 25 °C.

Segundo (*INMET [25]*), a faixa de temperaturas para o conforto térmico humano é de 18 °C a 28 °C, e será usado como critério para análise de viabilidade técnica para implantação do condicionador geotérmico. Outro critério usado são os limites de temperatura para um bom funcionamento do condicionador geotérmico. Nesta dissertação, adota-se como limite $\pm 2,5$ °C em relação à temperatura média anual do ambiente.

Para o caso do Brasil, observa-se que praticamente toda a região sul e sudeste do Brasil tem viabilidade para implantação do condicionamento geotérmico. Para as demais regiões, a viabilidade está restrita a lugares com altitude superior a 400 m, como é o caso do município de Água Branca, Alagoas, com 605 m de altitude. Consultando o banco de dados da estação meteorológica com a referência OMM 82989 do INMET, localizado nesta cidade, e analisando-se os dados que se encontram digitados no BDMEP do período de 1976 a 2013, a temperatura média anual deste local é de 23 °C.

Os gráficos apresentados nas figuras 5.18 a 5.20 que seguem, foram elaborados com base no banco de dados do INMET. Por exemplo, eles sugerem a possibilidade de condicionamento geotérmico nas regiões registradas para que se possa manter uma residência nos limites de temperatura entre 20,5 °C e 25,5 °C, como ilustra o gráfico da figura 5.18.

Analogamente, a figura 5.19 apresenta o estudo de caso para o município de Barbalha, Ceará, com altitude de 409 m. Consultando o banco de dados da estação meteorológica deste local com a referência OMM: 82784 do INMET, analisando-se os dados do período de 1971 a 2014, esta cidade mantém uma temperatura média anual de 25,5 °C, sendo possível então o condicionamento geotérmico dentro dos limites de temperatura entre 23 °C e 28 °C. Esta região de serra aonde se encontra o município de Barbalha, se estende de Valença/PI até

Garanhuns/PE, e de Campina Grande/PB até palmas/TO. Com características climáticas semelhantes.

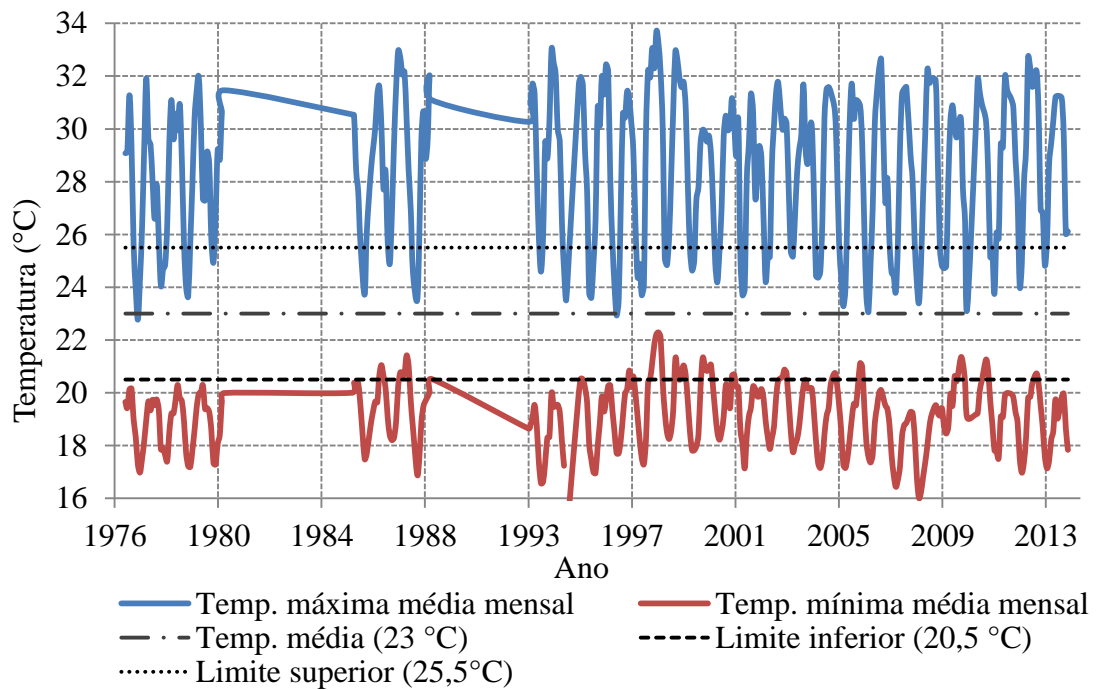


Figura 5.18 – Temperaturas médias mensais do município de Água Branca - AL

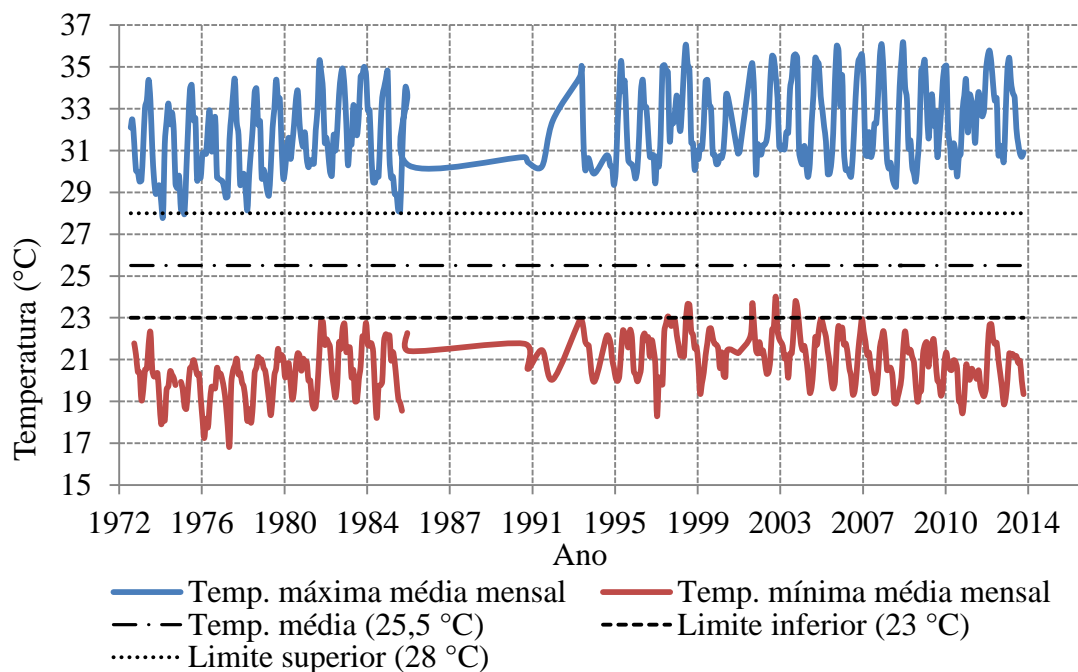


Figura 5.19 – Temperaturas médias mensais do município de Barbalha - CE

A figura 5.20 apresenta o estudo de caso para a cidade de Brasília, D. F., com altitude de 1.160 m. A estação meteorológica com a referência OMM: 83377 do INMET está localizada em Brasília, DF. Neste local, a temperatura média anual é de 20,8 °C e é possível o condicionamento geotérmico, mantendo uma residência com os limites de temperatura entre 18,3 °C e 23,3 °C. Esta característica pode ser estendida ao planalto central, de Belo Horizonte/MG a Goiânia/GO, de Brasília/ DF a Petrolina/PE.

Do sul ao nordeste do Brasil, existem cidades com elevações superiores a 400 m de altitude em relação ao nível do mar. Como por exemplo, o planalto com praticamente dois mil quilômetros de extensão, que principia em Londrina/PR e termina em Petrolina/PE.

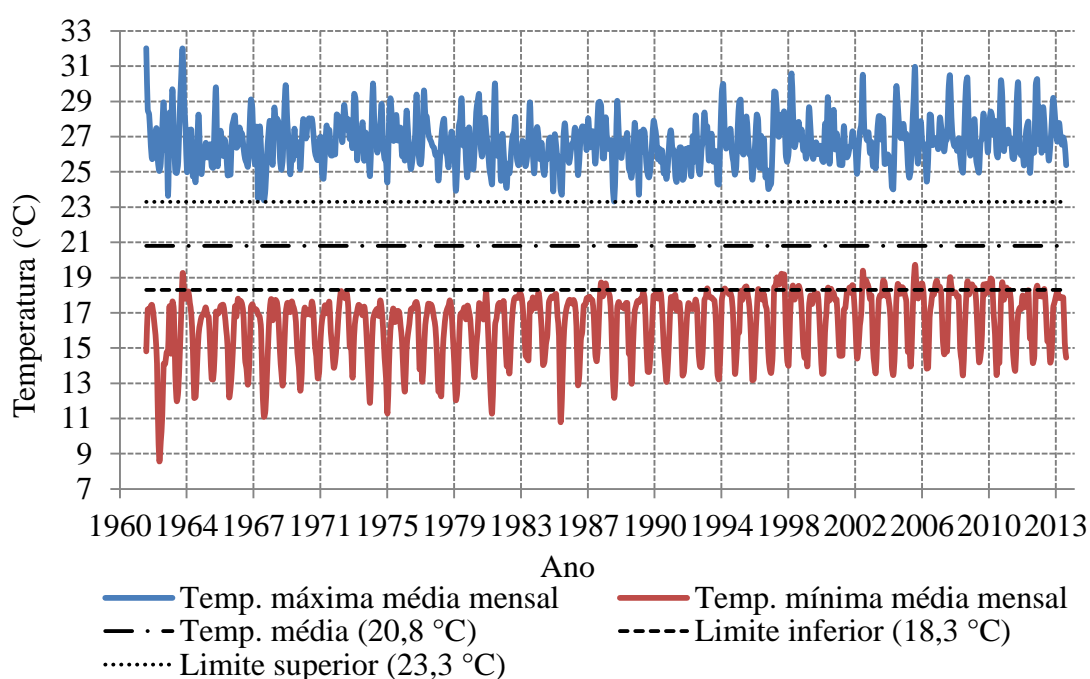


Figura 5.20 – Temperaturas médias mensais do município de Brasília – D.F.

Analisando o gráfico das temperaturas médias mínimas e máximas da cidade de Brasília, percebe-se que estas médias de temperatura estão sempre acima ou abaixo das linhas de operação do condicionador geotérmico, o que indica que a economia de energia elétrica seria permanente.

Para ser ter uma ideia dos custos de aplicação do condicionamento geotérmico e seus controles elétricos tal como proposto neste trabalho, a tabela 5.3 apresenta uma lista dos itens que o compõe e dos itens utilizados para fins de comparação, seus respectivos valores e especificações. Na data de sua implantação (out/2014), o custo de instalação do condicionador geotérmico na sala protótipo usado nesta dissertação, conforme a tabela 5.3, é de R\$ 2.539,00.

Tabela 5.3 – Custo dos componentes do protótipo (1US\$ = R\$2.45 em 21/10/2014)

Componente	Valor unitário (R\$)	Quantidade	especificações
Mangueiras	150,00	3	1"
Bomba hidráulica	399,00	1	12 V, 7 A
Evaporador MI – 094 – 7 ½"	990,00	1	Trocador de calor Com ventilador
Instalação mangueiras	200,00	2	Horas de retroescavadeira
Controlador eletrônico	200,00	1	10A
Diversos	100,00		Abraçadeiras, conexões, etc.

5.10 Vida útil

Nesta seção, apresenta-se uma análise da possibilidade prática do sistema composto pelo condicionador geotérmico. Esta análise foi feita considerando o tempo de vida útil das mangueiras de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), que compõem o componente crítico do condicionador geotérmico para manutenção e eventual reposição. Segundo informações do fabricante (*Techtubo [39]*), o PEAD enterrado tem vida útil de no mínimo 50 anos, mas pode passar de 100 anos.

5.11 Resumo do capítulo

Neste capítulo discutem-se os elementos que compõem o condicionador geotérmico. Inicialmente, se apresentou os diagramas elétricos e de controle que mostram os princípios de funcionamento dos equipamentos utilizados nesta dissertação. Além disso, apresentou-se o projeto do conversor CC-CC e mostrou-se porque foi escolhido o conversor *buck*, considerando a sua elevada eficiência, estabilidade e implantação simples.

Foi visto também o controlador HCC que faz a busca da máxima troca térmica. No fluxograma do HCC, observa-se que o passo é fixo pela facilidade de implantação, mas o passo escolhido para a variação do ciclo de trabalho foi bem pequeno para minimizar os erros e oscilações em torno do ponto ótimo.

Em seguida, mostrou-se o levantamento da carga térmica e o projeto do trocador de calor geotérmico, onde é possível ter-se uma ideia da energia que se pode aproveitar e do dimensionamento mínimo das mangueiras, para uma efetiva troca de calor com o solo.

Neste capítulo também foi feito um estudo de possibilidade de instalação para algumas regiões do Brasil.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 Introdução

Para levantamento de dados práticos sobre condicionamento geotérmico foi instalado um protótipo composto de uma sala de testes e uma sala de referência. A sala de testes possui um trocador de calor de ciclo fechado que realiza troca térmica com o ambiente a ser condicionado e dissipa esta energia térmica no solo. A sala de referência é uma sala com carga térmica semelhante à sala de testes, de tal maneira que é possível comparar os dados de ambas as salas. Realizou-se a coleta de dados durante dois anos de medição, dando ênfase ao ano de 2014, o qual foi posto em funcionamento o controle eletrônico HCC.

Em todos os experimentos foram feitas comparações entre a sala de referência e a sala de teste. Além disso, se levou em conta três situações: No ano de 2013 o condicionador geotérmico trabalhou sem o controle HCC. No ano de 2014 foi implantado o controle HCC no condicionador geotérmico, e na sala de referência foi instalado um ar condicionado de janela que foi usado para comparação do consumo de energia elétrica entre os dois sistemas, trata-se de um equipamento com classificação energética “A” e compressor rotativo. Especificações do ar condicionado são apresentadas no Anexo VI.

Nos experimentos, foi utilizado um sistema de aquisição de dados capaz de armazenar simultaneamente diversos dados como data, hora, temperaturas, tensão e corrente elétrica do ar condicionado, dos motores da bomba de água e do ventilador. A aquisição de dados foi implantada de modo que os dados fossem lidos a cada 5 minutos e armazenados em um arquivo. Maiores detalhes sobre a aquisição de dados são apresentados no Apêndice B.

A figura 6.1 apresenta a foto do trocador de calor geotérmico na sala de teste e do ar condicionado na sala de referência.

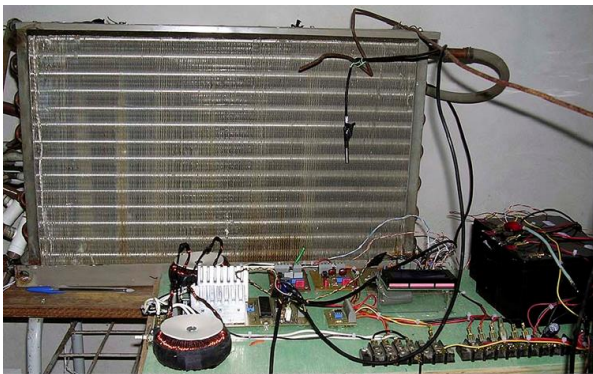


Figura 6.1 - Foto do trocador de calor geotérmico e do ar condicionado

6.2 Temperaturas nas salas mantidas nas condições naturais

No mês de setembro de 2013 o condicionamento térmico na sala de teste permaneceu desligado. Assim, foi possível a observação das temperaturas naturais na sala de teste e na sala de referência. No gráfico da figura 6.2 são apresentadas as leituras da temperatura externa e também das temperaturas na sala de teste e na sala de referência do dia 03 de setembro de 2013.

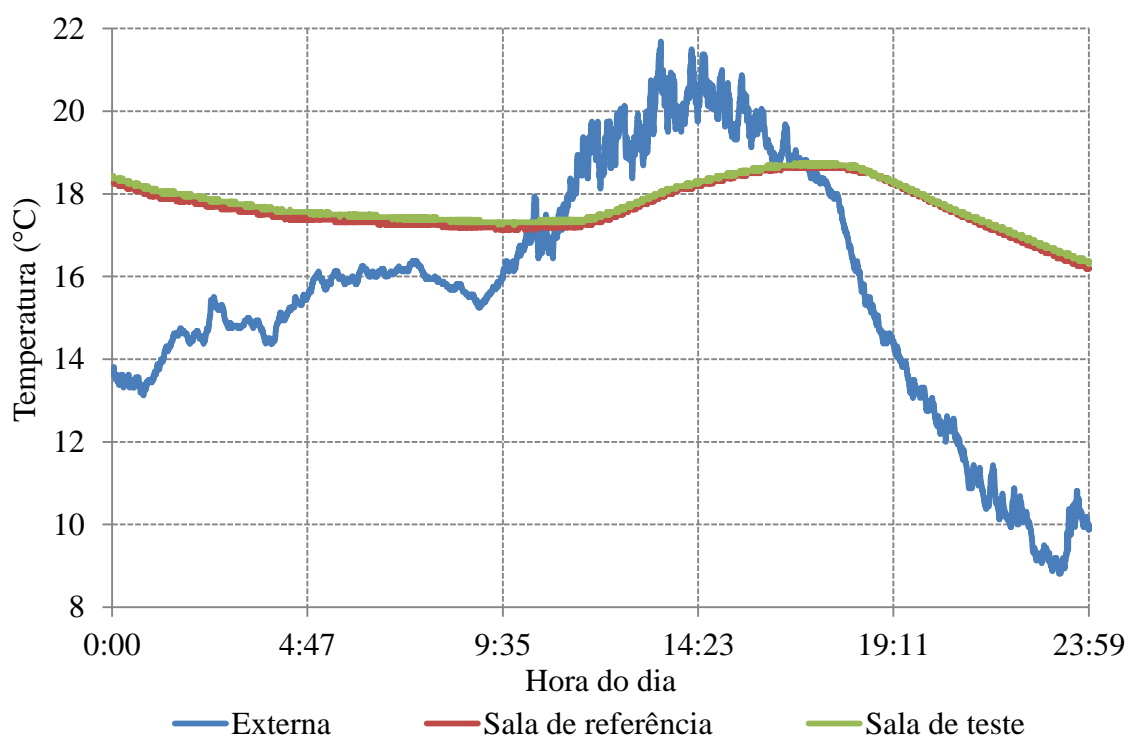


Figura 6.2 - Temperaturas do dia 03 de setembro de 2013

6.3 Condicionamento térmico da sala de testes sem o controle eletrônico HCC

O condicionamento térmico da sala de testes sem o controle eletrônico HCC foi realizado no ano de 2013. Neste procedimento, o funcionamento tanto da bomba hidráulica como do ventilador ocorreu com valores de tensão e corrente pré-determinados, possibilitando a observação do seu comportamento com diferentes valores de consumo de energia elétrica.

A figura 6.3 mostra os dados obtidos no dia 19 de janeiro de 2013, no qual a bomba hidráulica foi alimentada com 9,5 V e 3,9 A e o ventilador alimentado com 13,5 V e 2,35 A, com consumo total de 68,77 Wh. O ponto de máxima transferência térmica ocorreu às 17h08m, com uma diferença de 4,19 °C entre a sala de teste e a sala de referência.

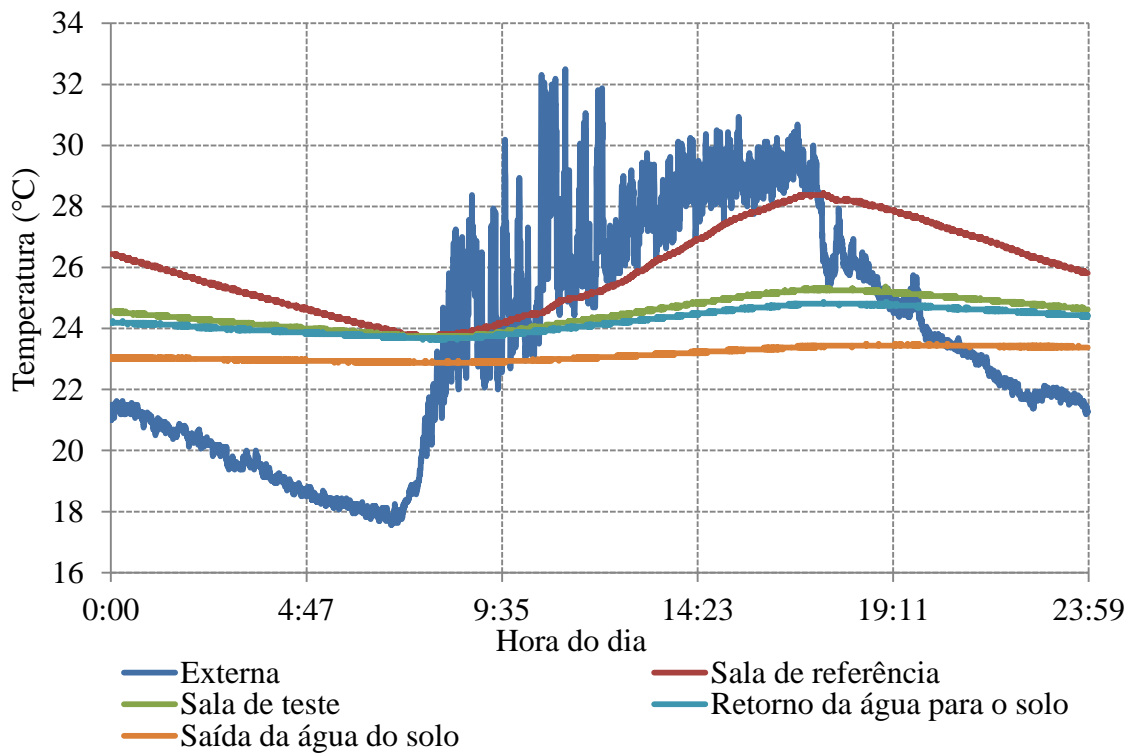


Figura 6.3 - Temperaturas do dia 19 de janeiro de 2013

A figura 6.4 apresenta os dados do dia 19 de julho de 2013.

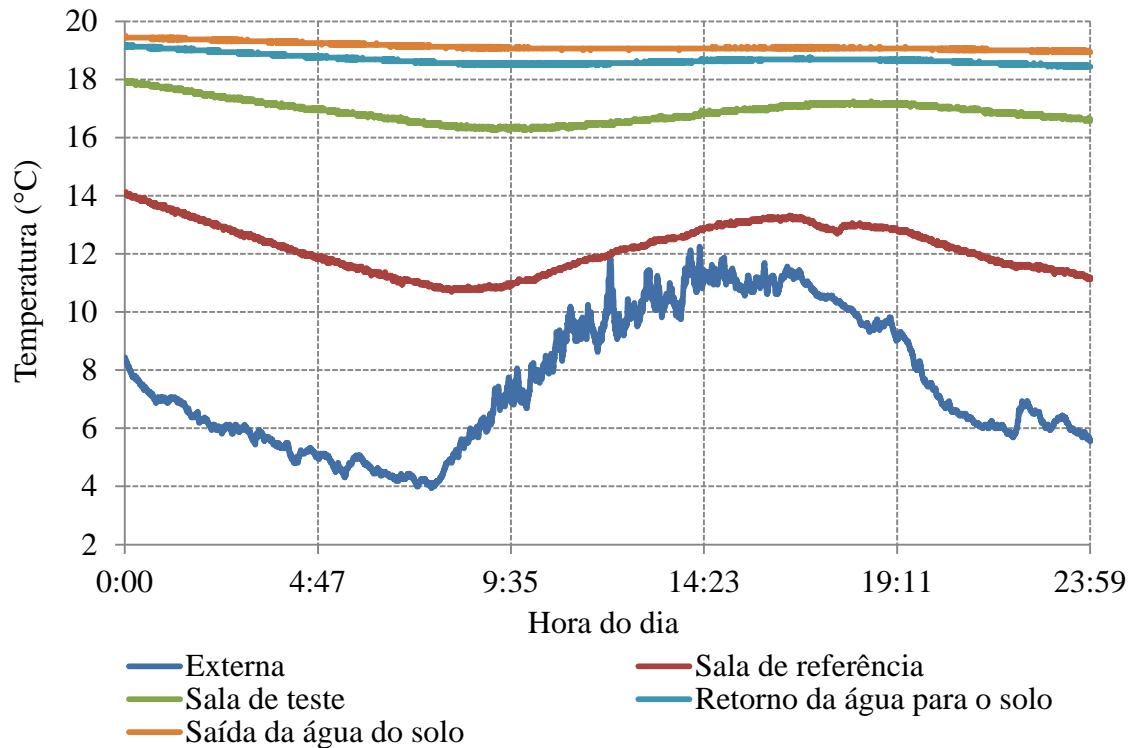


Figura 6.4 - Temperaturas do dia 19 de julho de 2013

Neste dia a bomba hidráulica foi alimentada com 7 V e 3,6 A e o ventilador alimentado com 11,5 V e 1,83 A, com um consumo total de 46,24 Wh. O ponto de máxima transferência térmica ocorreu às 8h16m, com uma diferença de 5,6 °C entre a sala de teste e a sala de referência, os dados coletados podem ser observados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Horário de máxima transferência térmica

Hora	Temp. externa (°C)	Temp. sala de referência (°C)	Temp. sala de teste (°C)	Temp. de retorno para o solo (°C)	Temp. de saída do solo (°C)
08:16	5,06	10,75	16,37	18,56	19,12

A figura 6.5 mostra os dados obtidos no dia 11 de agosto de 2013. A bomba de circulação de água foi alimentada com 9,2 V e 4,3 A e o ventilador alimentado com 17,3 V e 3,5 A, com um consumo total de 100,1 Wh. No ponto de máxima transferência térmica neste dia, constatou-se uma diferença de 5,5 °C entre a sala de testes e a sala de referência.

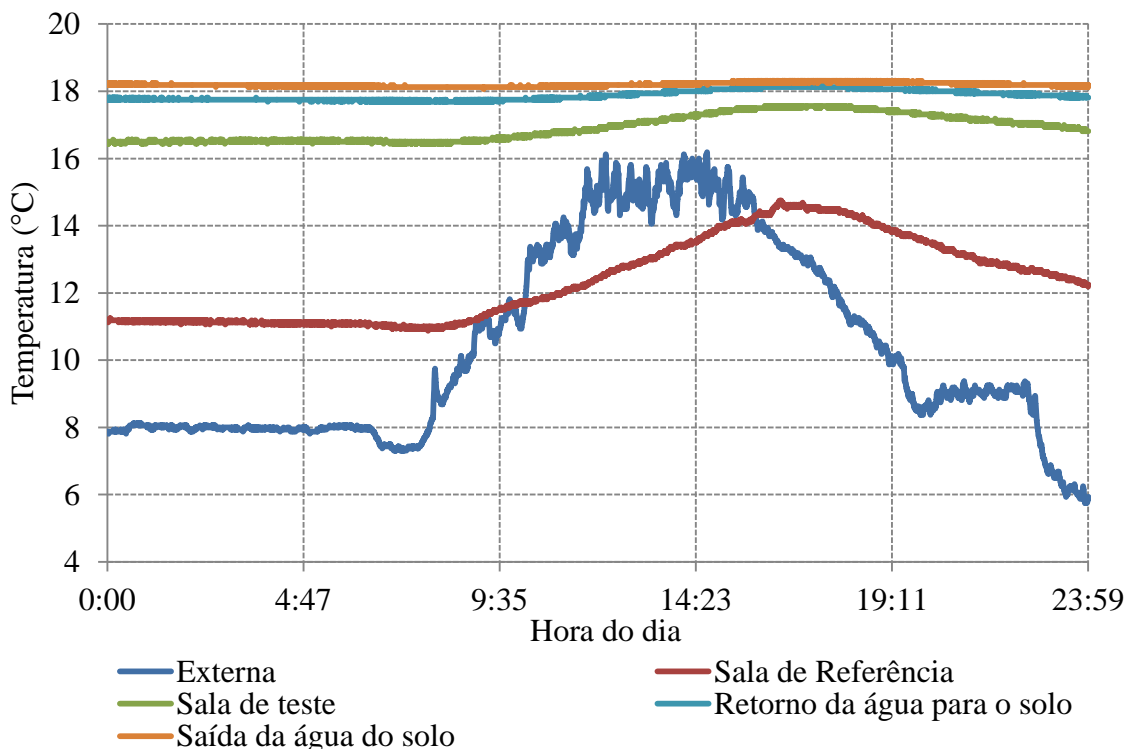


Figura 6.5 - Temperaturas do dia 11 de agosto de 2013

O condicionamento térmico da sala de testes sem o controle eletrônico HCC teve como objetivo a compreensão dos processos de trocas térmicas envolvidas. Foram feitos testes de condicionamento térmico para determinar se a energia geotérmica superficial seria capaz de suprir a carga térmica do ambiente a ser condicionado e se este fornecimento de energia térmica seria constante e inesgotável. Os resultados apontaram que é possível condicionar um ambiente dentro dos limites estabelecidos como conforto térmico para o ser humano, com um baixo consumo de energia elétrica. Foram testados diversos valores de alimentação na bomba hidráulica e no ventilador, mas o experimento não foi conclusivo sobre a velocidade do líquido circulante nos trocadores térmicos que determinam o ponto de máxima absorção de energia térmica do solo. Logo, optou-se por uma inteligência artificial para o gerenciamento do fluxo de água no interior das mangueiras e do ar que passa pelo trocador de calor.

6.4 Condicionamento da sala de testes com o controle eletrônico HCC

Os experimentos com o controle eletrônico para encontrar o ponto ótimo da troca de calor entre as mangueiras e o solo foram realizados durante o verão do ano de 2014. Foi utilizado um microcontrolador PIC 16F877A para o gerenciamento HCC do condicionador geotérmico. O PIC coleta os valores das temperaturas da sala de testes e do ar que sai do trocador de calor, executa a análise das temperaturas e aciona o controle do conversor CC-CC da bomba de água e do ventilador. Também foi implantado um dispositivo de controle do ar condicionado com um PIC 18F4520. Este dispositivo coleta os valores de temperatura na sala de teste e na sala de referência, compara os dois valores e aciona uma contatora para ligar e desligar o ar condicionado, mantendo a temperatura na sala de referência em valores bastante próximos da temperatura da sala de teste. Este dispositivo também armazena dados em um SD card a cada 5 minutos com os valores da tensão da rede elétrica e da corrente relativa ao consumo do ar condicionado, para posterior comparação com o condicionador geotérmico. Maiores detalhes sobre o circuito de controle do ar condicionado e aquisição de dados são apresentados no Apêndice A.

Em todos os experimentos foram feitas comparações entre um ambiente de referência e um ambiente com o sistema de condicionamento geotérmico. Além disso, se levou em conta duas situações para o ambiente de referência:

- a) Com condicionamento térmico realizado pelo ar condicionado de janela;
- b) Em condições naturais.

Os objetivos de se coletar estes resultados são:

- 1) Verificação do funcionamento e ajuste do controlador eletrônico de acionamento do conversor CC-CC e do sistema de aquisição de dados;
- 2) Fazer um estudo do limite de temperatura possível de se utilizar no condicionamento térmico de um ambiente em relação à temperatura do solo;
- 3) Verificar o consumo elétrico da bomba que executa a circulação do fluido, do ventilador e do circuito de controle destes componentes;
- 4) Verificar o consumo elétrico do ar condicionado;
- 5) Verificar o quanto pode ser economizado de energia elétrica usando a energia geotérmica com o controle HCC;
- 6) Comparar os resultados do condicionamento geotérmico com o condicionamento convencional que utiliza ar condicionado;
- 7) Tentar manter a temperatura no ambiente de testes o mais constante possível em relação à temperatura desejada.

Nas próximas seções são apresentados os resultados obtidos no ambiente referente ao condicionamento térmico com EGS e a temperatura correspondente no ambiente de referência. Com as duas situações comentadas anteriormente, também são apresentados os resultados referentes ao consumo de energia elétrica e um comparativo entre o consumo elétrico de cada equipamento.

6.4.1 Uso do condicionador geotérmico para aquecimento

Durante os meses de maio a agosto de 2014 foram coletadas temperaturas, correntes e tensões elétricas dos equipamentos instalados na sala de testes e na sala de referência. O experimento começou no dia 28 de maio de 2014 e terminou no dia 16 de agosto de 2014. O condicionador geotérmico permaneceu ligado durante todo este período, exceto durante os intervalos de tempo em que a temperatura na sala de testes se encontrava dentro dos limites de temperatura estabelecidos no programa de controle, como limites mínimos de arrefecimento e máximo para aquecimento.

6.4.1.1 Comparação do consumo de energia elétrica entre o condicionador geotérmico e o convencional

Para comparar o consumo de energia elétrica, os equipamentos foram mantidos ligados durante todo o período do inverno de 2014. A figura 6.6 mostra o gráfico das

temperaturas do dia 28 de maio. A figura 6.7 mostra o gráfico das temperaturas do dia 30 de maio de 2014.

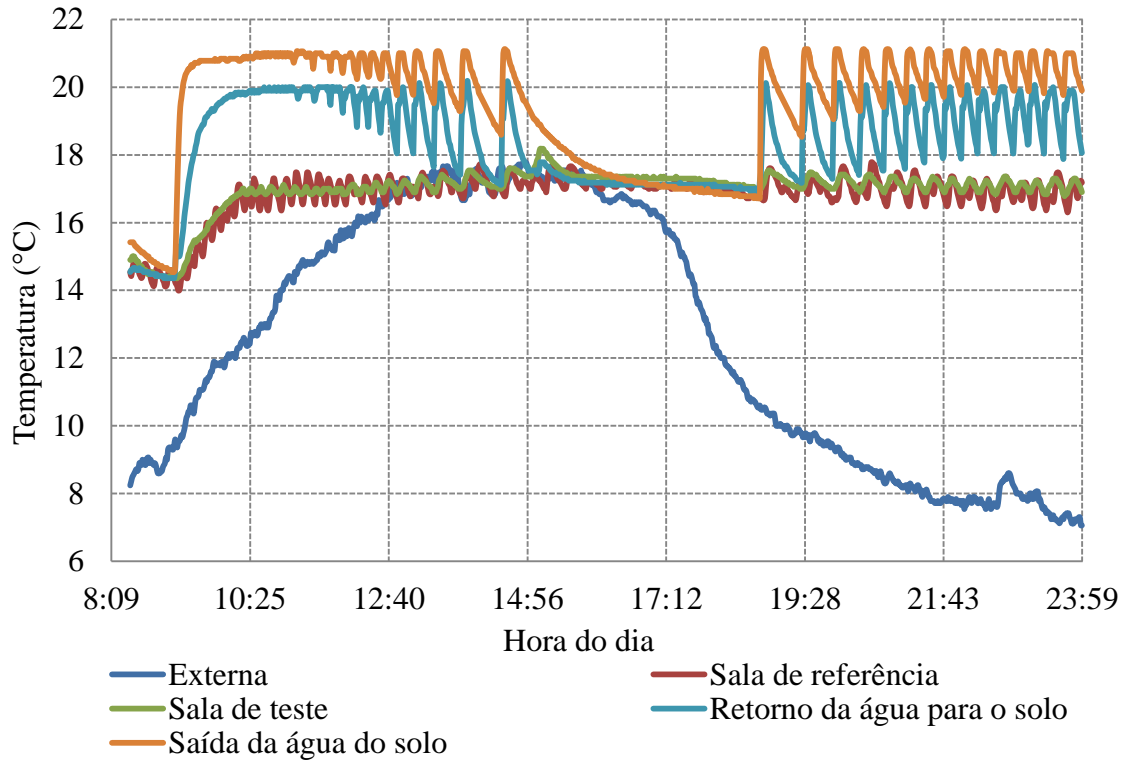


Figura 6.6 - Temperaturas do dia 28 de maio de 2014

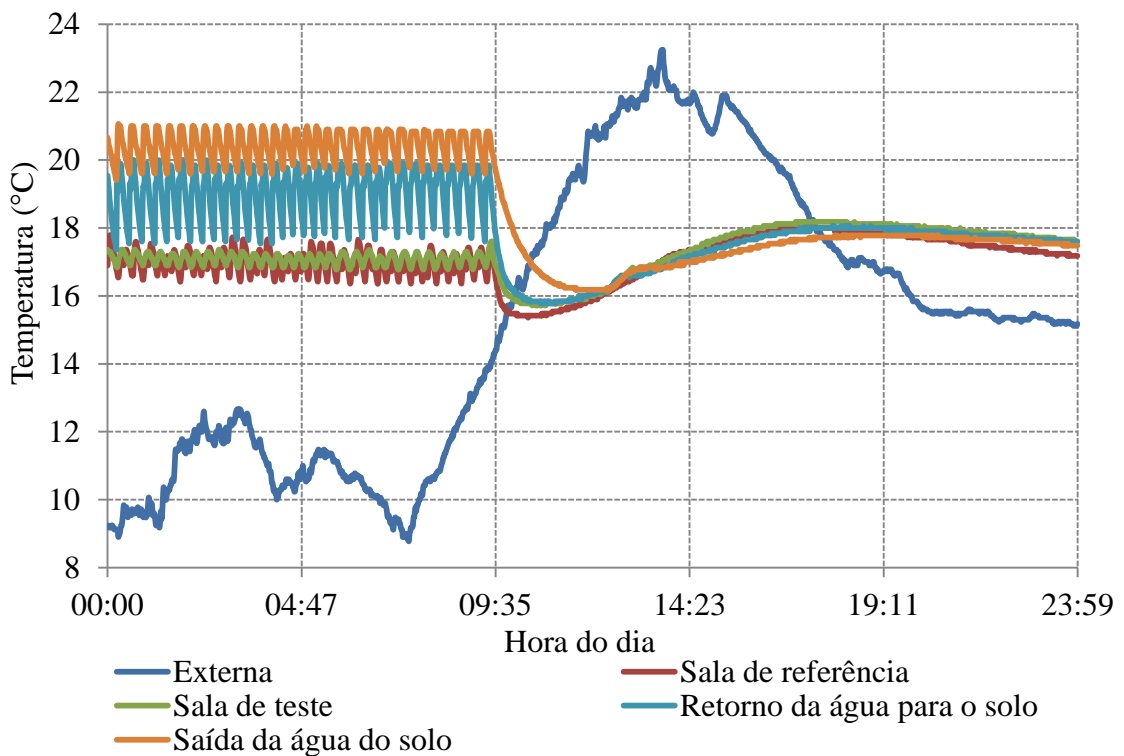


Figura 6.7 - Temperaturas do dia 30 de maio de 2014

As figuras 6.8 e 6.9 mostram o gráfico do consumo de energia elétrica de cada equipamento neste dia.

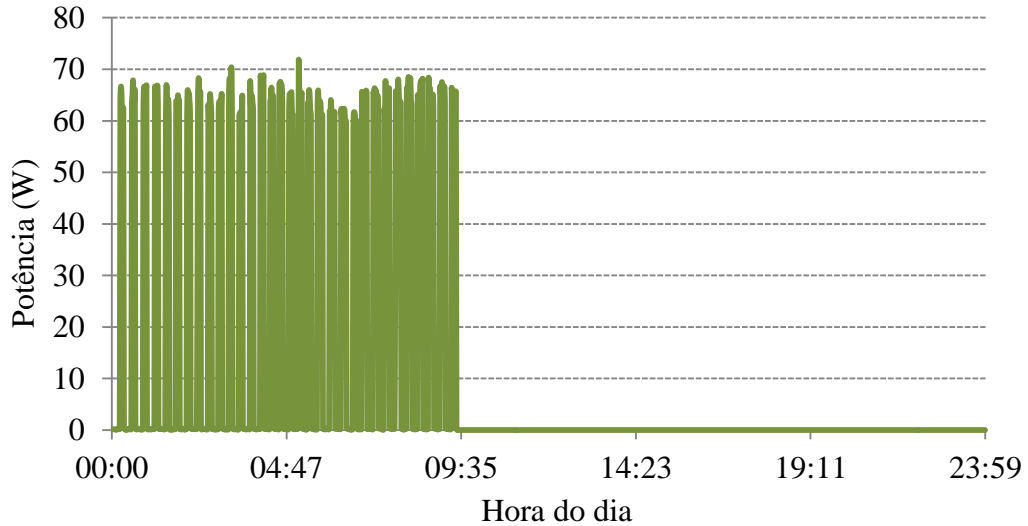


Figura 6.8 - Consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico no dia 30 de maio

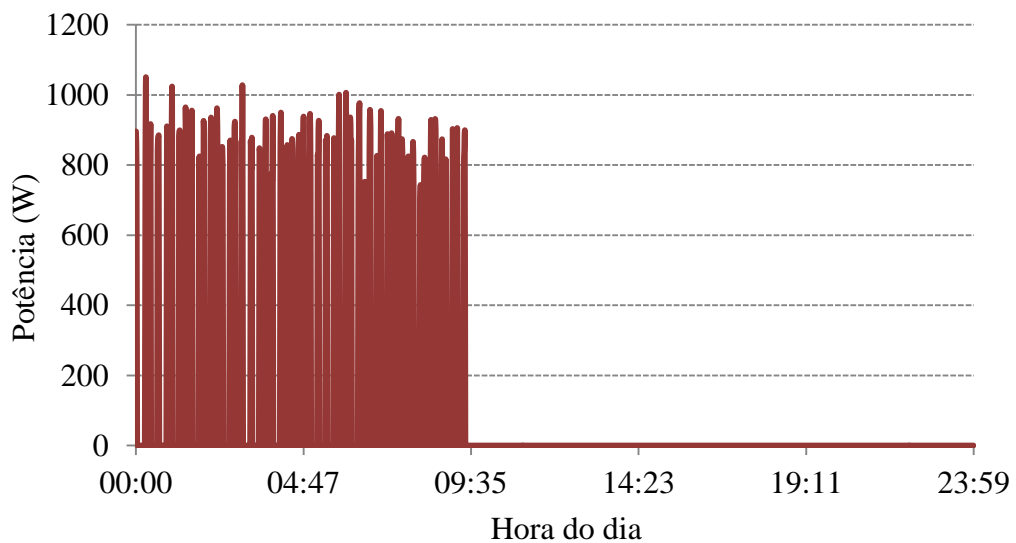


Figura 6.9 - Consumo de energia elétrica do ar condicionado no dia 30 de maio

Durante o mês de junho, foi adicionado um sensor de temperatura para medir a temperatura do ar na saída do condicionador geotérmico para verificar a transferência térmica entre o trocador de calor e o ar ambiente, como pode ser visto na figura 6.10. Observa-se neste gráfico que o controle HCC ajusta a temperatura do ar que sai do trocador de calor na média, igual a média da temperatura da água que retorna para o solo.

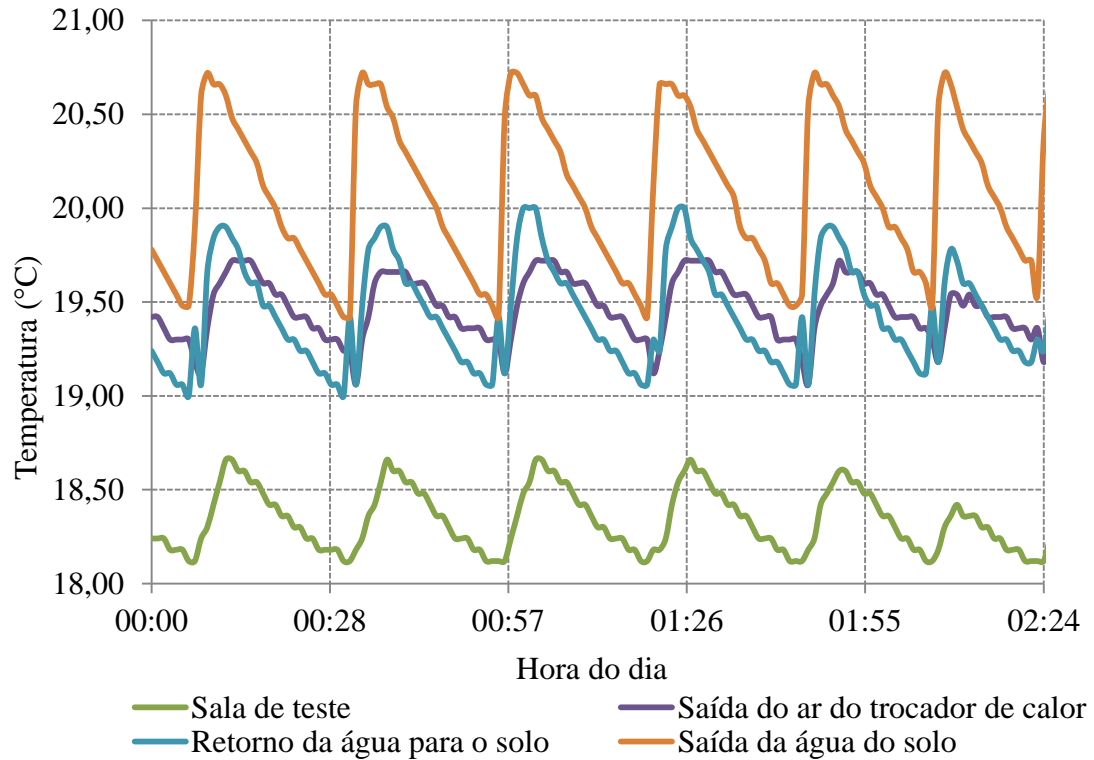


Figura 6.10 - Temperaturas do dia 05 de junho de 2014

Nos dias 02 e 03 de junho foi feita uma tentativa para verificar se o condicionador geotérmico suportaria manter a sala de teste aquecida em 19 °C. Para este caso, o controle HCC não encontrou um ponto ótimo e o conversor CC-CC atingiu o limite máximo de funcionamento, permanecendo a bomba hidráulica e o ventilador ligados ininterruptamente sem conseguir atingir o objetivo. Fica claro que o trocador de calor enterrado da forma como foi dimensionado não tem condições de suprir a demanda térmica. O resultado não foi satisfatório e pode ser visto na figura 6.11. Observa-se que no início deste experimento a temperatura na sala de testes estava na temperatura desejada e o controle HCC demonstrava um pequeno ajuste. Porém, a temperatura na sala foi diminuindo gradativamente e o HCC perdeu o recurso de controle, bem como a temperatura da água proveniente do solo foi perdendo a capacidade de manter a troca térmica, evidenciando uma saturação da temperatura do solo no entorno das mangueiras. Neste caso, a resistência térmica do solo impede o fluxo de calor necessário para manter a sala de teste aquecida na temperatura desejada.

Para suprir esta demanda térmica é necessário um novo projeto de dimensionamento do trocador de calor enterrado, com mais área de contato com o solo e maior capacidade de troca de calor, com espaçamentos maiores entre as espiras das mangueiras.

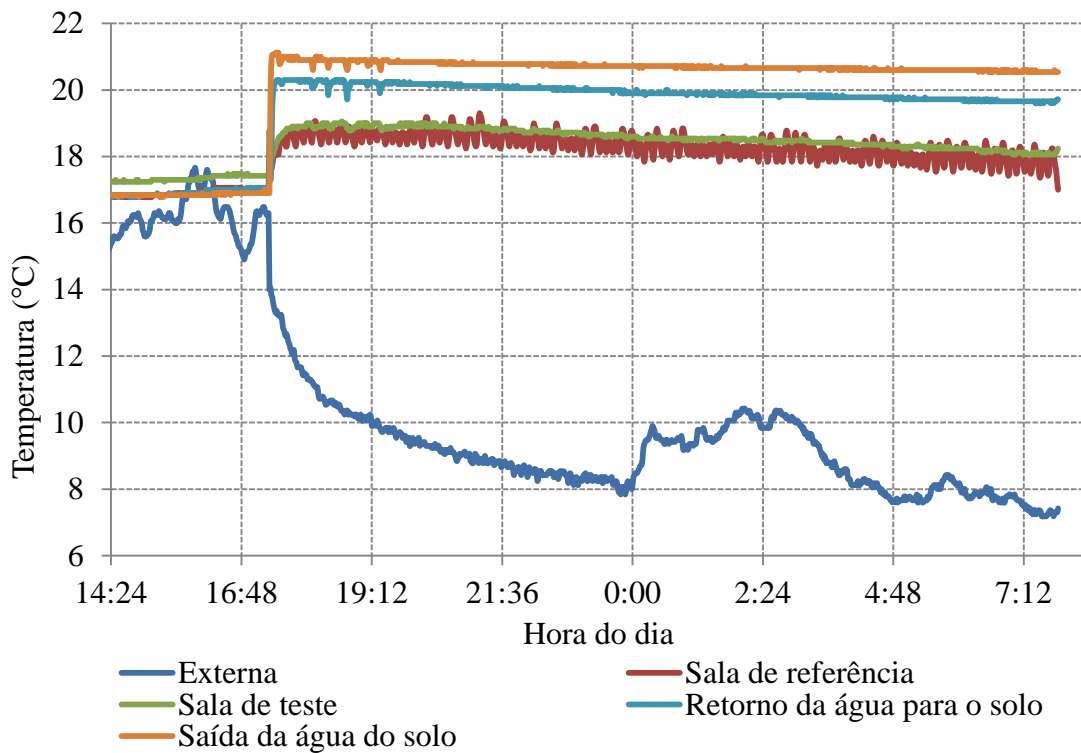


Figura 6.11 - Temperaturas dos dias 02 e 03 de junho de 2014

A partir do dia 03 de junho a temperatura de controle foi alterada para 18 °C, com o objetivo de se observar se o trocador de calor enterrado suportaria a carga térmica nesta condição. Observou-se que durante os períodos de temperaturas extremas houve uma leve queda na temperatura da sala de teste, atingindo 17,5 °C, indicando que para este caso também é necessário um aumento na área de troca de calor com o solo.

A figura 6.12 mostra o gráfico das temperaturas do período de 28 de maio a 08 de junho, com o detalhe da mudança do limite da temperatura de controle para 18 °C. A figura 6.13 mostra a comparação do consumo de energia elétrica diário para este período.

No dia 02 de junho houve uma pequena interrupção no funcionamento do ar condicionado, como pode ser observado no gráfico, mas o defeito não se repetiu e foi impossível determinar a causa deste problema.

No período de 09 a 18 de junho o ar condicionado na sala de referência foi mantido desligado para que fosse possível a comparação da temperatura na sala de teste com a temperatura da sala de referência sujeita apenas às temperaturas naturais.

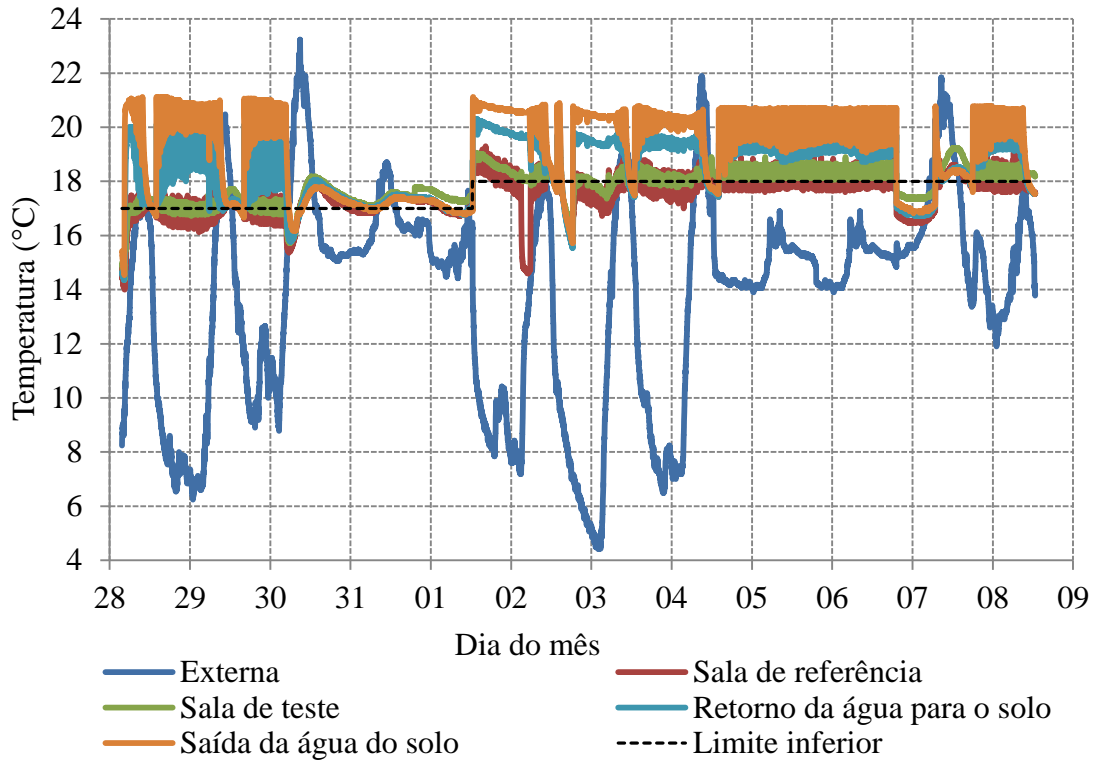


Figura 6.12 - Temperaturas dos dias de 28 de maio a 08 de junho de 2014

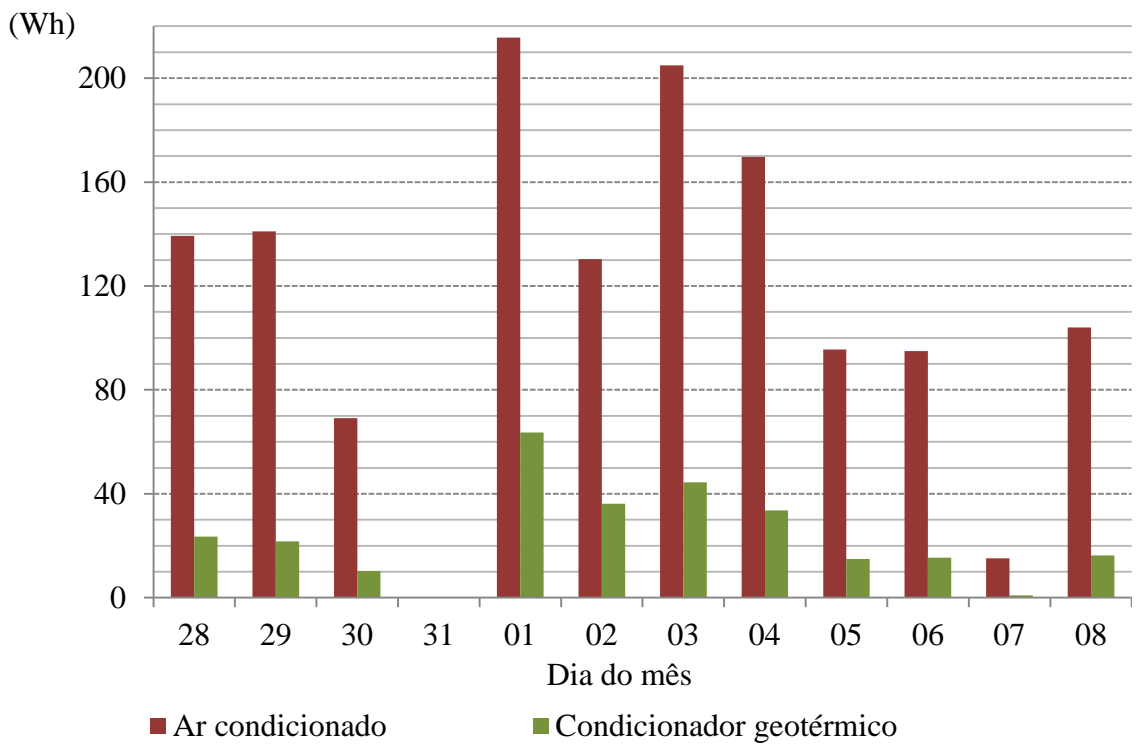


Figura 6.13 - Consumo de energia elétrica dos dias de 28 de maio a 08 de junho de 2014

A figura 6.14 mostra as temperaturas no período de 18 a 30 de junho de 2014 e a figura 6.15 mostra a comparação do consumo de energia elétrica diário. A partir de 18 de junho a temperatura de controle na sala de teste retornou para o valor de 17 °C.

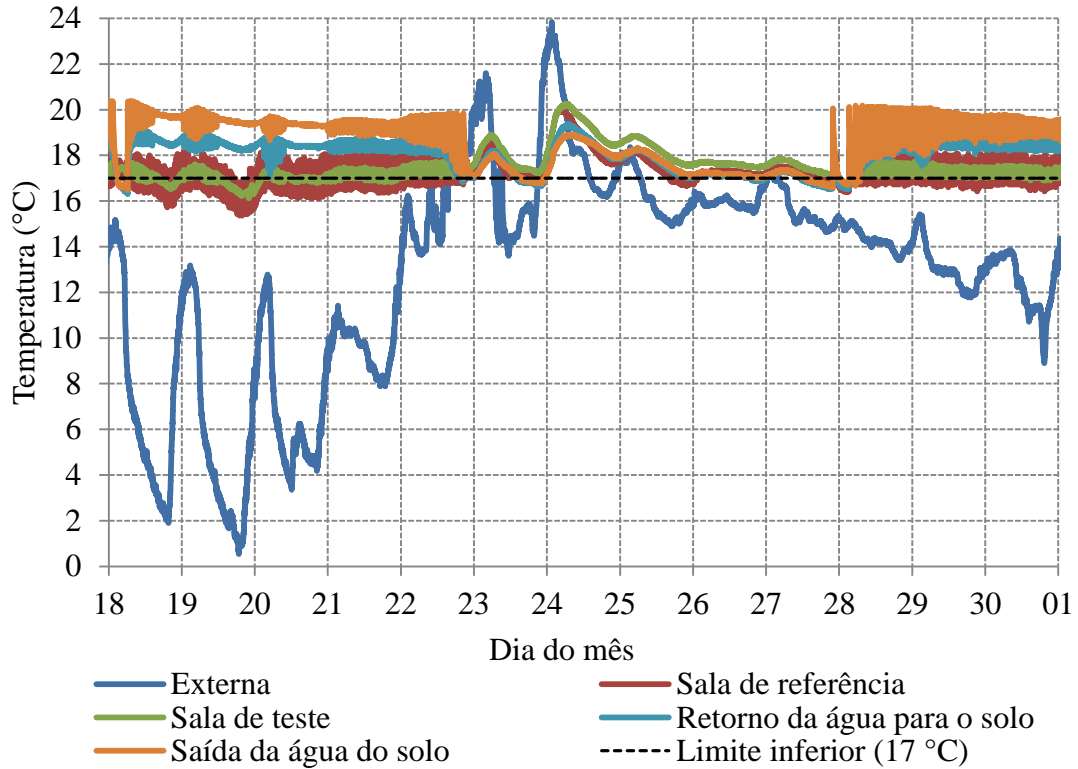


Figura 6.14 - Temperaturas dos dias de 18 a 30 de junho de 2014

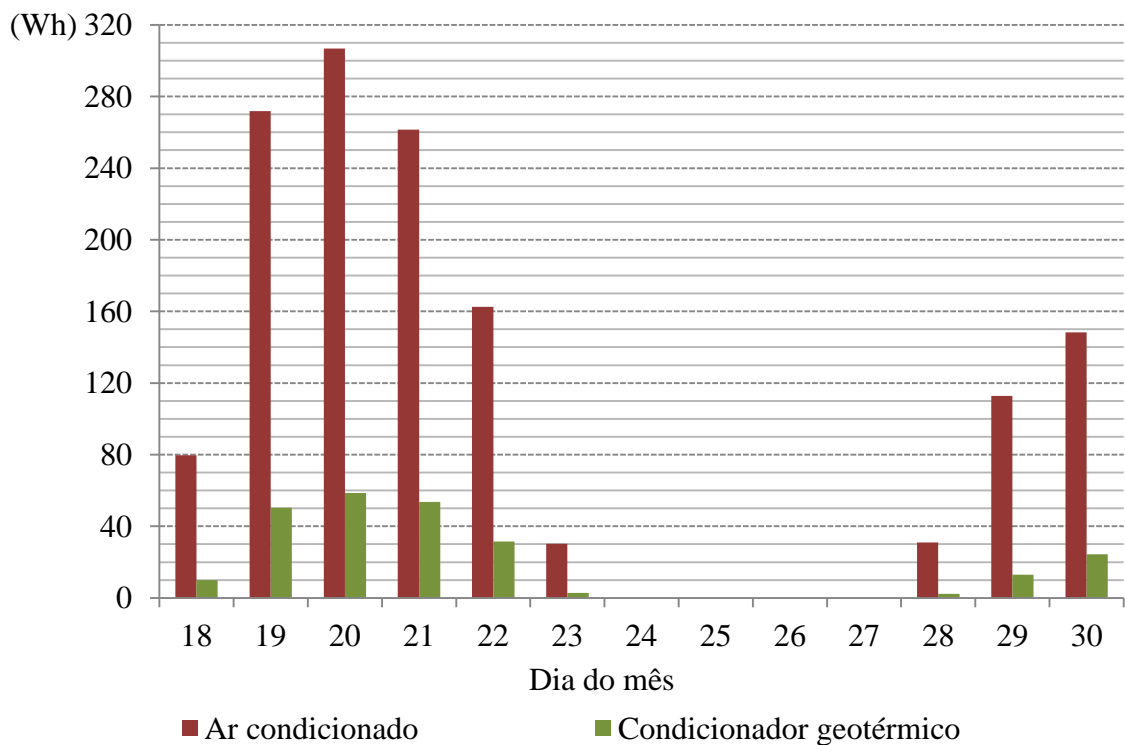


Figura 6.15 - Consumo de energia elétrica dos dias de 18 a 30 de junho de 2014

A figura 6.16 mostra as temperaturas no período de 01 a 13 de julho de 2014 e a figura 6.17 mostra a comparação do consumo de energia elétrica diário.

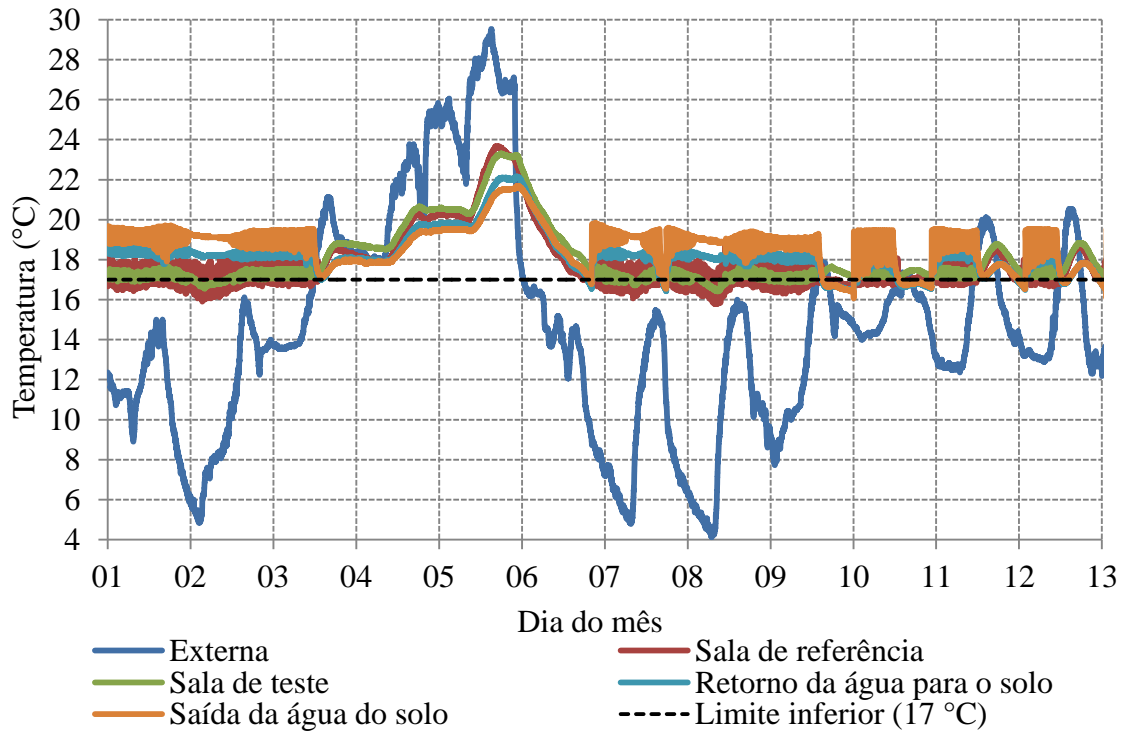


Figura 6.16 - Temperaturas dos dias de 01 a 13 de julho de 2014

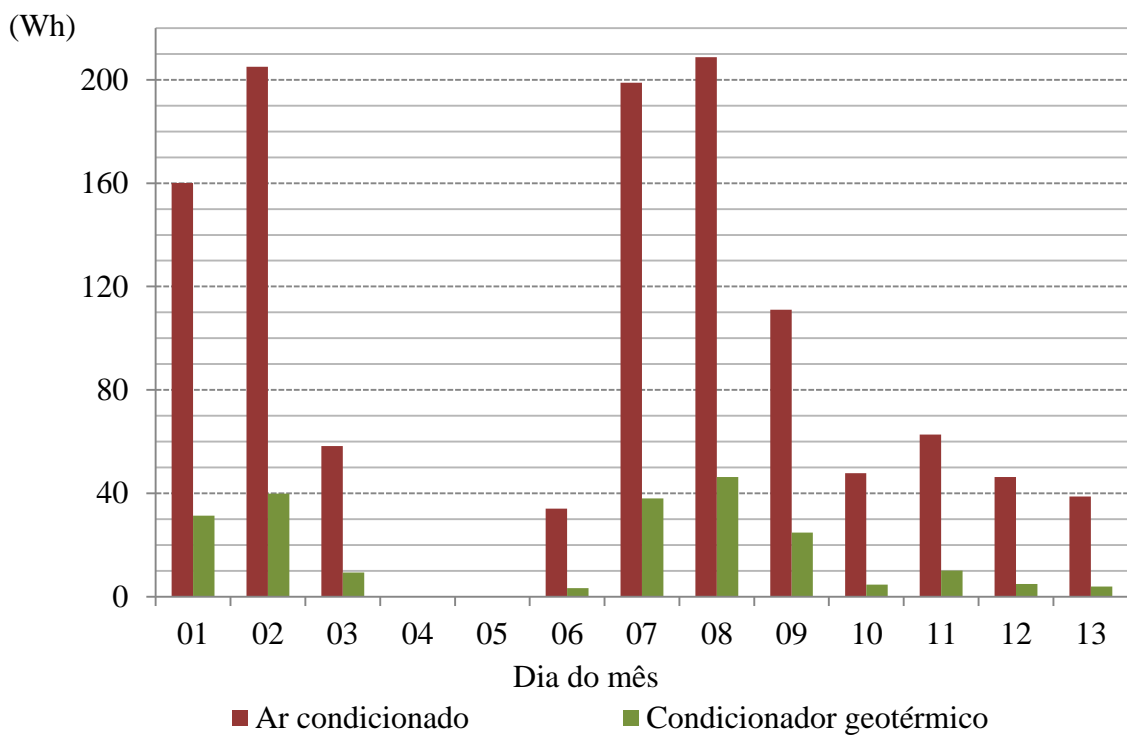


Figura 6.17 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 13 de julho de 2014

A figura 6.18 mostra as temperaturas no período de 22 a 30 de julho de 2014 e a figura 6.19 mostra a comparação do consumo de energia elétrica diário.

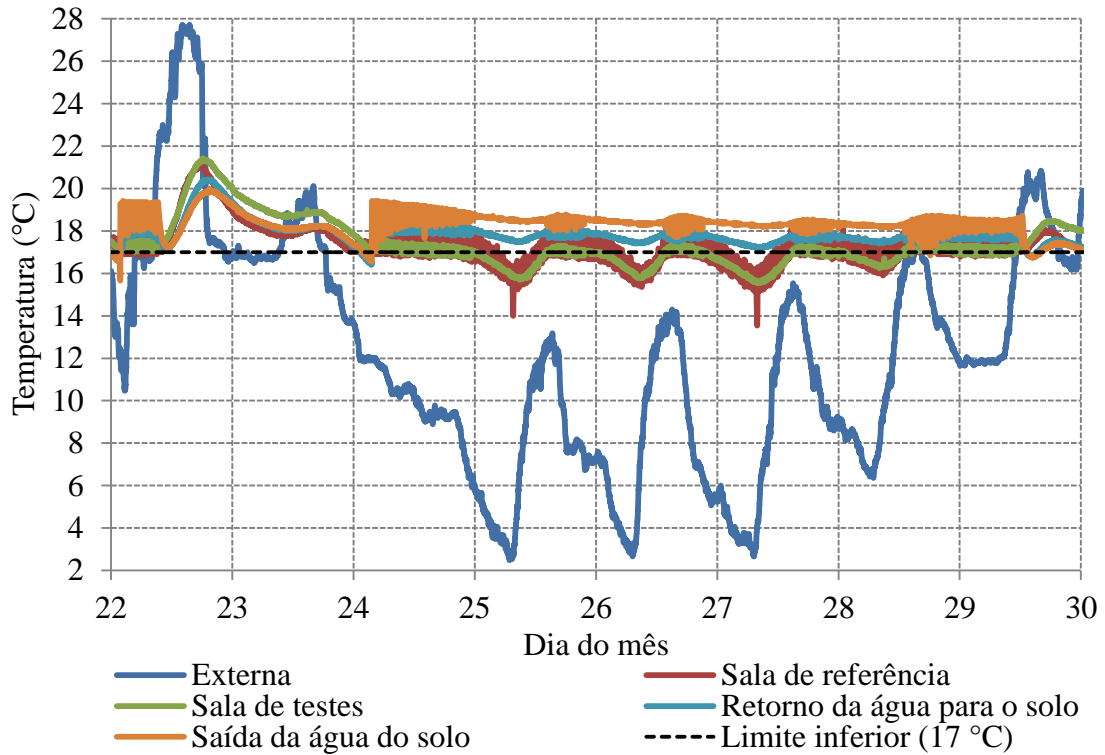


Figura 6.18 - Temperaturas dos dias de 22 a 30 de julho de 2014

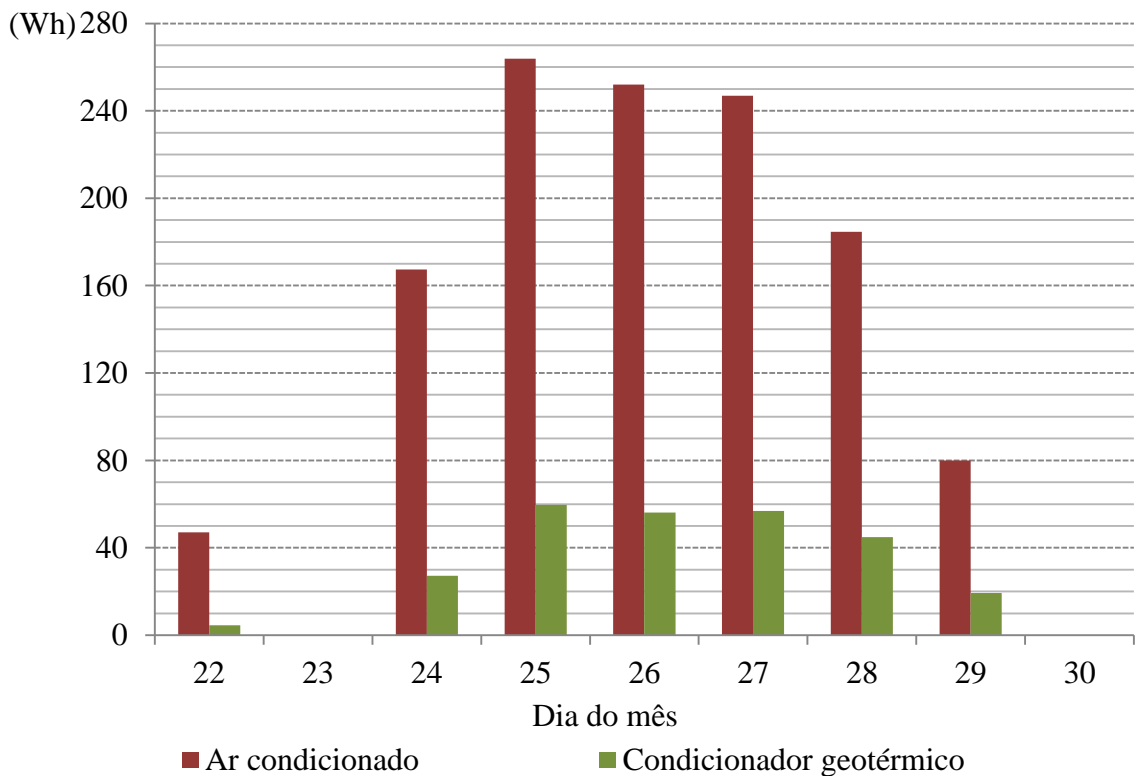


Figura 6.19 - Consumo de energia elétrica dos dias de 22 a 30 de julho de 2014

Finalizando o inverno, a figura 6.20 mostra as temperaturas do período de 05 a 16 de agosto de 2014 e a figura 6.21 mostra a comparação do consumo de energia elétrica diário.

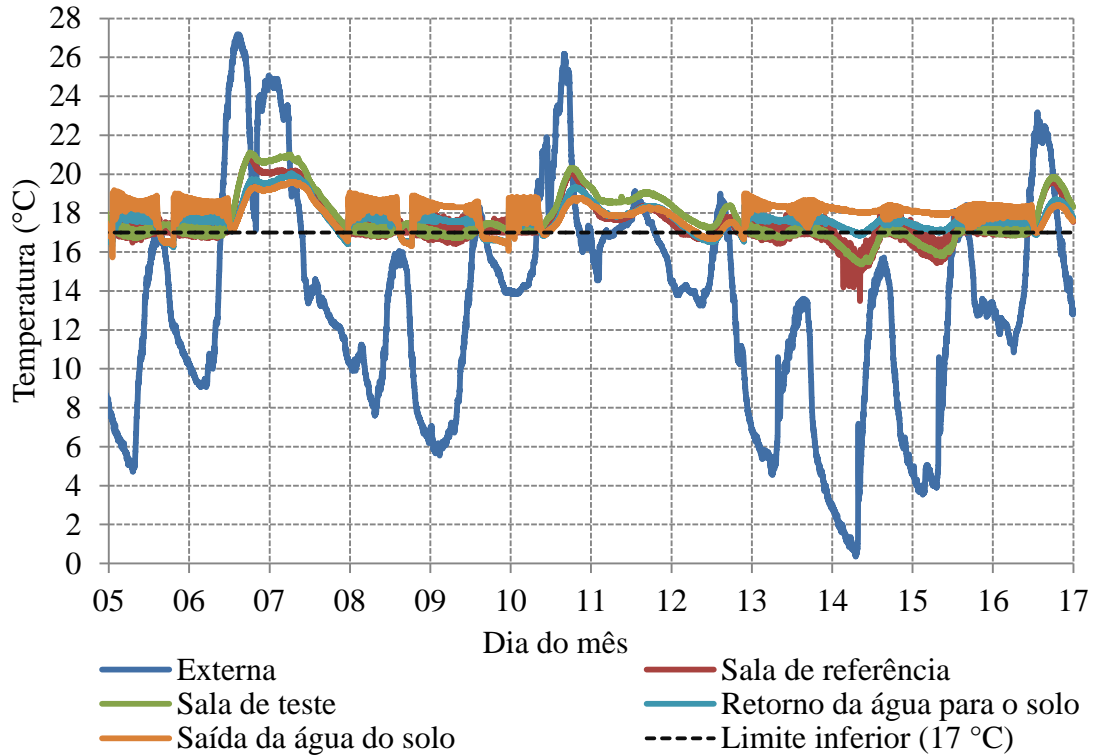


Figura 6.20 - Temperaturas dos dias de 05 a 16 de agosto de 2014

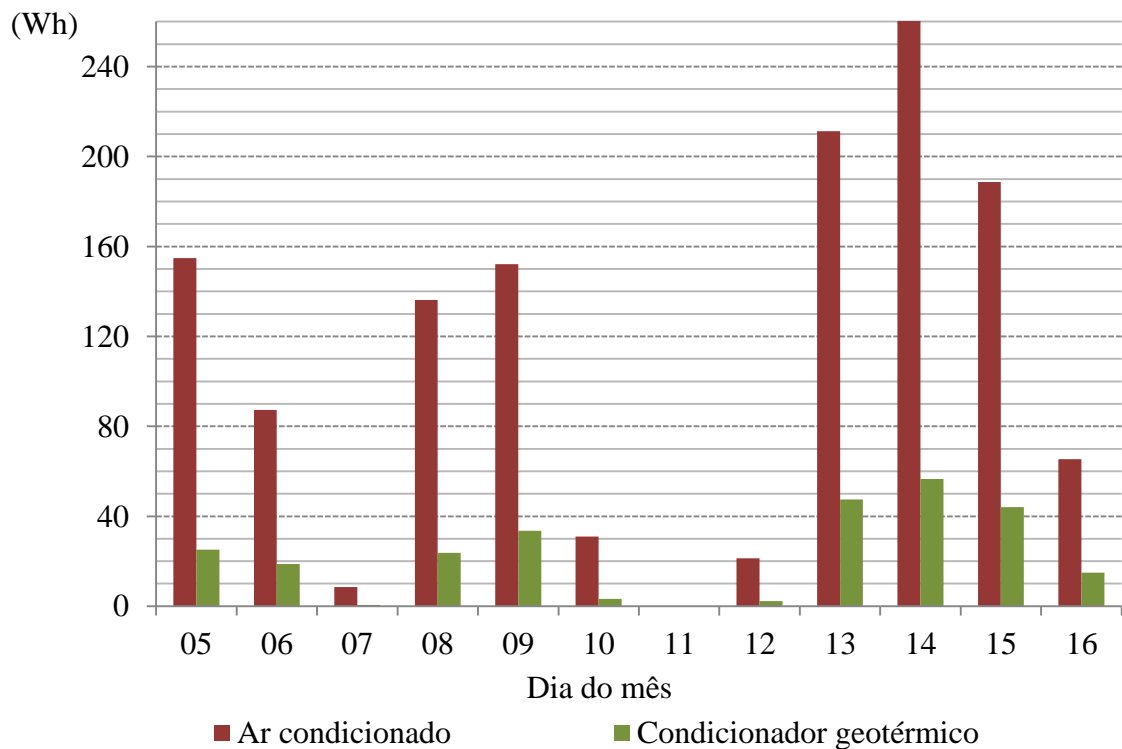


Figura 6.21 - Consumo de energia elétrica dos dias de 05 a 16 de agosto de 2014

6.4.1.2 Resultados parciais do consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico e do convencional para aquecimento

Do dia 28 de maio ao dia 16 de agosto de 2014 foram armazenados os dados de consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico e do ar condicionado. O condicionador geotérmico consumiu 1,28 kWh para manter a sala de testes condicionada nas condições experimentadas neste trabalho durante este intervalo de tempo. O ar condicionado consumiu 6,51 kWh para realizar a mesma tarefa. O condicionador geotérmico consumiu menos de 20% da energia elétrica necessária para manter a sala de referência nas mesmas condições térmicas da sala de teste. A figura 6.22 apresenta o resultado final de consumo de energia elétrica dos equipamentos durante o inverno de 2014.

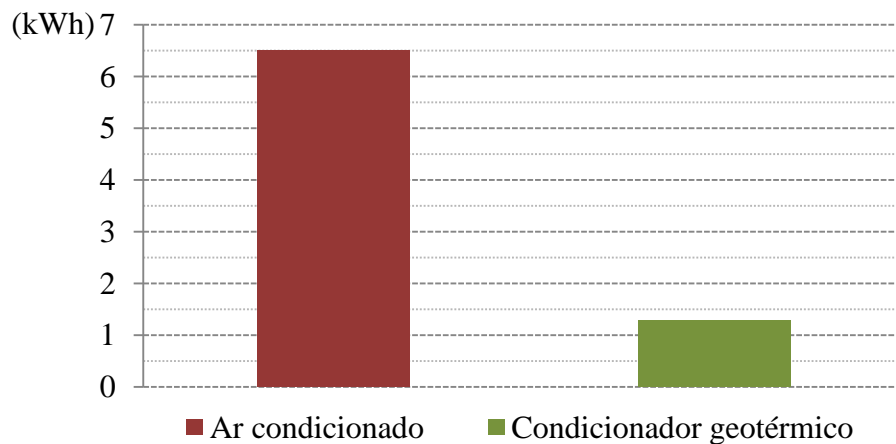


Figura 6.22 - Consumo de energia elétrica de 28 de maio a 16 de agosto de 2014

6.4.1.3 Temperatura média em cada sala durante o inverno de 2014

A temperatura média na sala de referência foi de 17,33 °C, e na sala de teste foi de 17,28 °C. A diferença de temperatura entre as duas salas foi de 0,05 °C, como pode ser visto na figura 6.23.

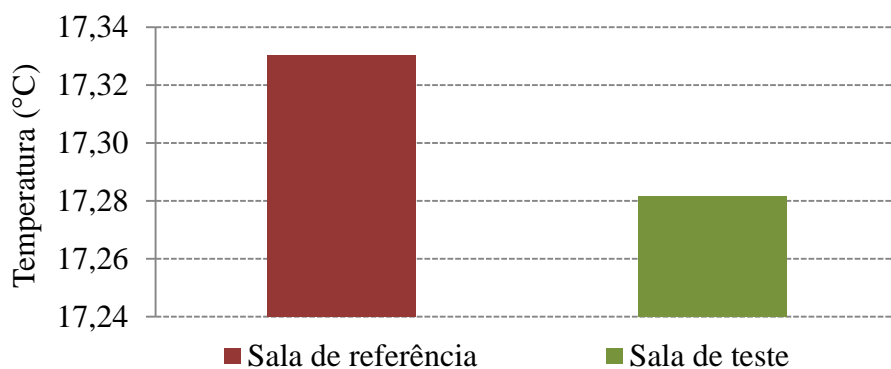


Figura 6.23 - Temperatura média de 28 de maio a 16 de agosto de 2014

6.4.1.4 Comportamento térmico na sala de referência sem condicionador de ar comercial

No dia 8 de junho de 2014, o ar condicionado comercial na sala de referência foi desligado. Permaneceu desligado até o dia 18 de junho de 2014 para que pudesse se observar o comportamento térmico neste ambiente e fazer um comparativo com a sala de testes sob condicionamento geotérmico. O ar condicionado também ficou desligado do dia 18 ao dia 21 de julho.

A figura 6.24 apresenta o gráfico das temperaturas do dia 8 de junho, quando houve o desligamento do ar condicionado na sala de referência, às 14h25m. Nota-se neste gráfico que há uma queda na temperatura na sala de referência enquanto que na sala condicionada geotermicamente a temperatura permanece constante. A temperatura de controle durante este experimento foi de 18°C para o condicionamento da sala de teste, no dia 18 de julho a temperatura de controle foi alterada novamente para 17°C.

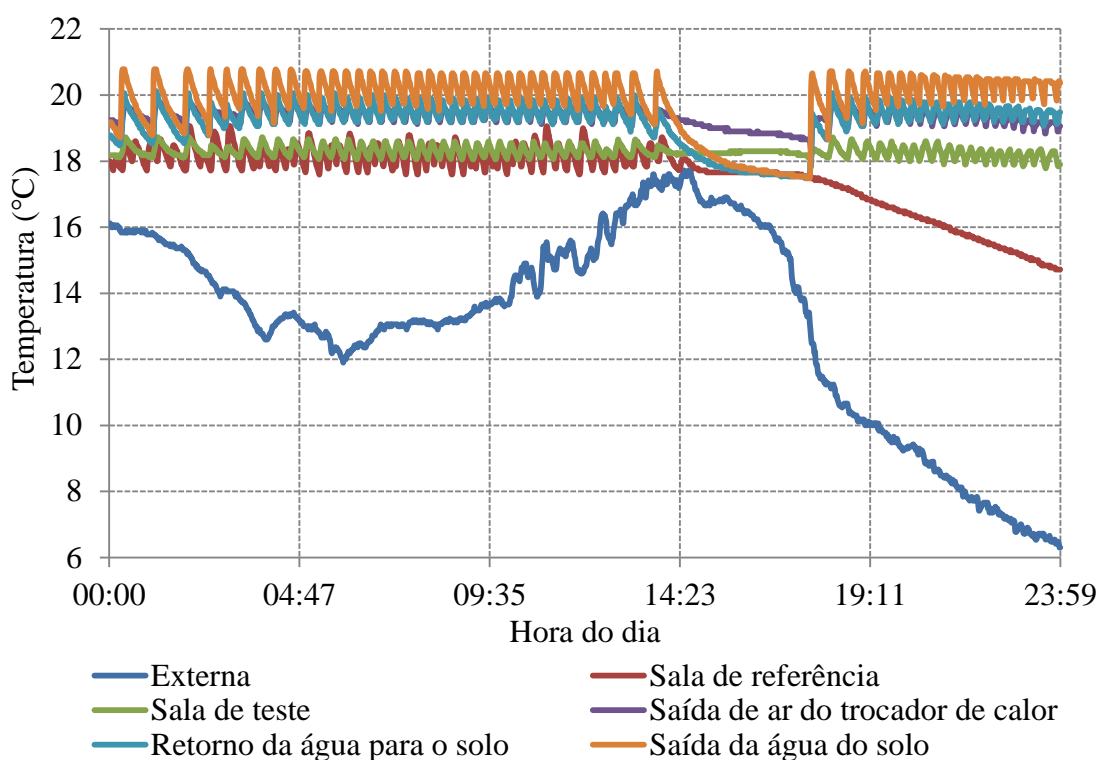


Figura 6.24 - Temperaturas do dia 08 de junho de 2014

No dia 09 de junho ocorreu a máxima diferença de temperatura entre os ambientes tratados nesta dissertação, durante o período de 28 de maio a 16 de agosto, que foi de 5,6 °C. A figura 6.25 apresenta o gráfico das temperaturas do dia 09 de junho.

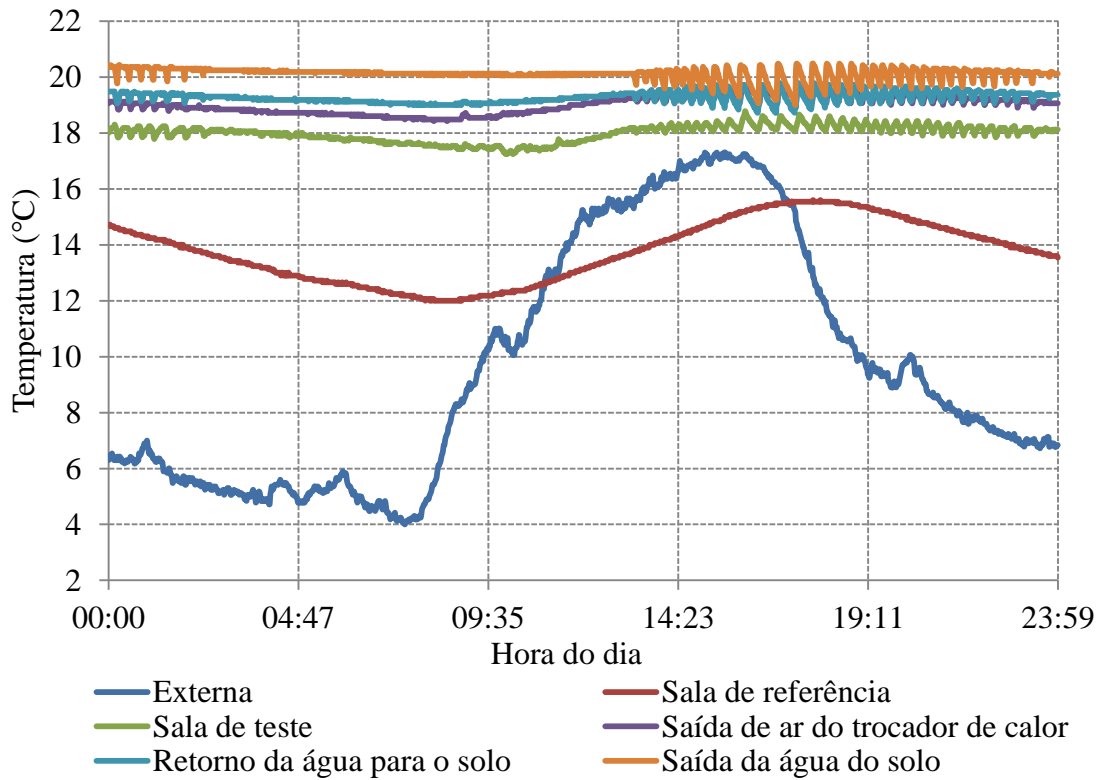


Figura 6.25 - Temperaturas do dia 09 de junho de 2014

A figura 6.26 apresenta o gráfico das temperaturas do dia 08 ao dia 18 de junho.

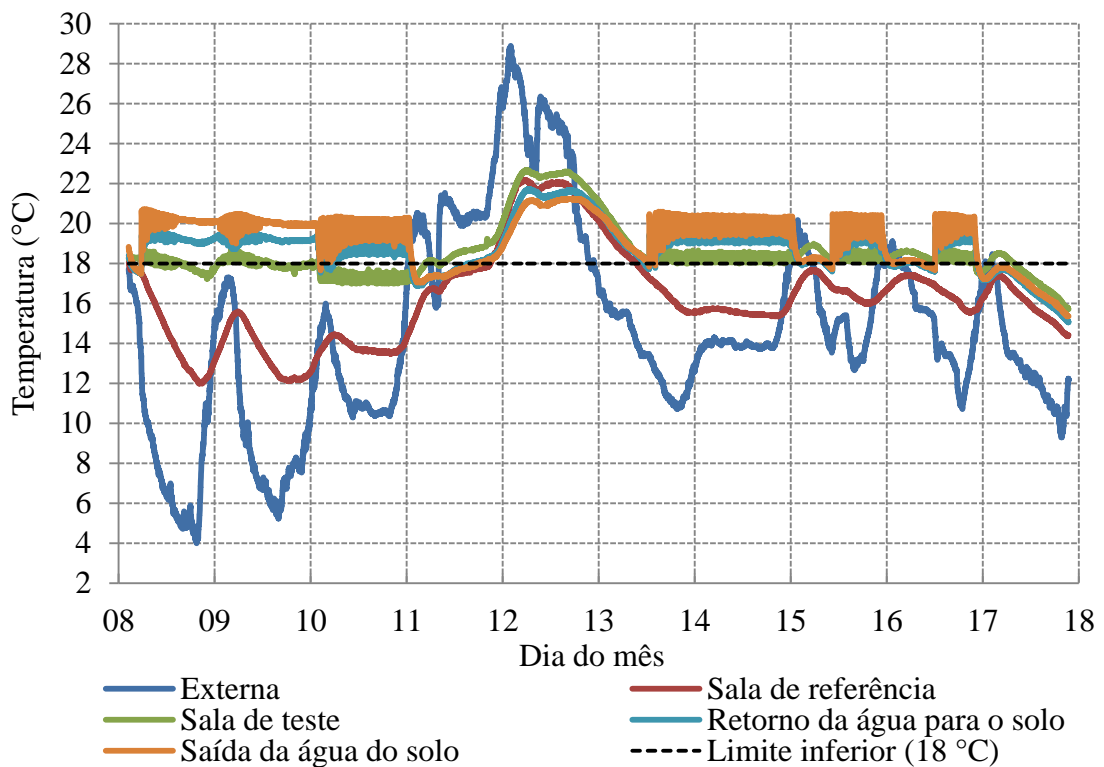


Figura 6.26 - Temperaturas dos dias de 08 a 18 de junho de 2014

A figura 6.27 apresenta o gráfico das temperaturas do dia 18 ao dia 21 de julho.

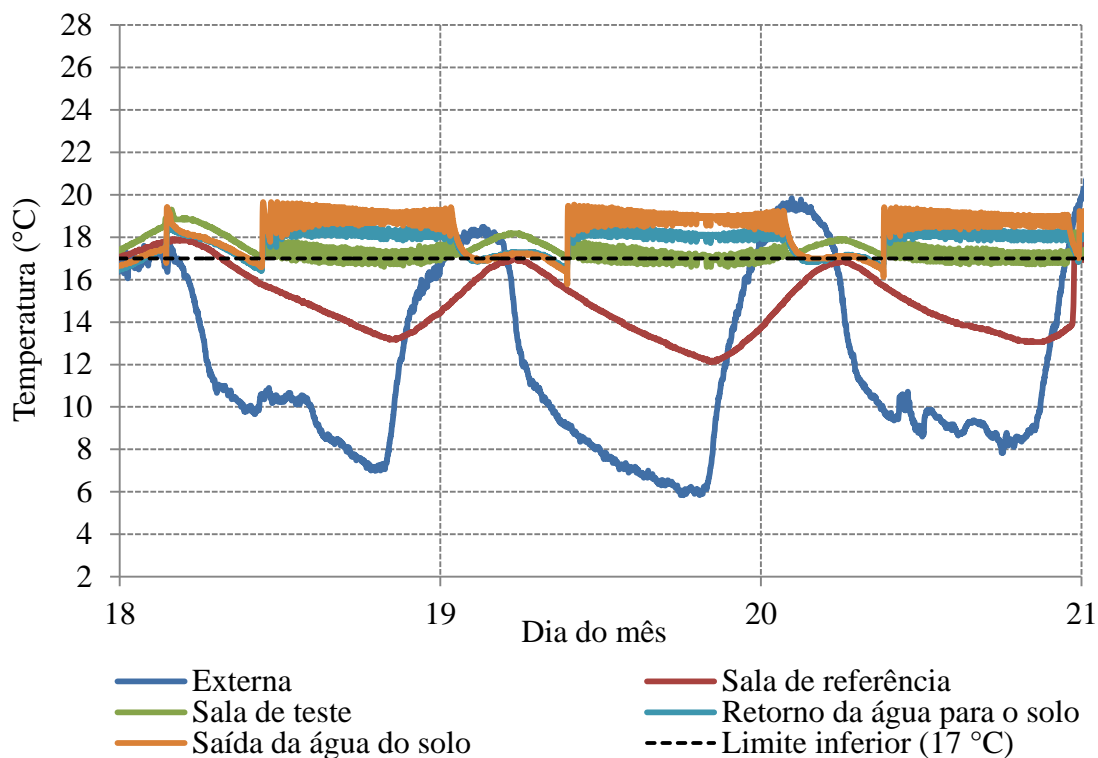


Figura 6.27 - Temperaturas dos dias de 18 a 21 de julho de 2014

6.4.1.5 Resultados finais com o condicionador geotérmico para aquecimento

A tabela 6.2 apresenta os resultados finais para o período de 28 de maio a 16 de agosto de 2014. Estes resultados demonstram que o condicionador geotérmico necessitou de 19,68% da energia consumida pelo ar condicionado comercial para manter a mesma carga térmica sob as mesmas condições de temperatura ambiente.

Tabela 6.2 - Resultados finais para o período de 28 de maio a 16 de agosto de 2014

Mês	Temp. média mensal na sala de referência (°C)	Temp. média mensal na sala de testes (°C)	Consumo mensal da sala de referência (kWh)	Consumo mensal da sala de testes (kWh)
maio	16,92	17,00	0,349	0,055
junho	17,63	17,68	2,435	0,472
julho	17,20	17,16	2,413	0,485
agosto	17,19	17,04	1,317	0,270
total	17,23	17,22	6,514	1,282

6.4.2 Condicionador geotérmico para arrefecimento

O uso do condicionador geotérmico para arrefecimento começou no dia 23 de outubro de 2014 e terminou no dia 28 de fevereiro de 2015. Foram coletados dados de temperaturas da sala de teste e da sala de referência, bem como os valores de tensão e corrente elétrica do condicionador geotérmico e do ar condicionado.

6.4.2.1 Comportamento térmico na sala de referência sem condicionador de ar

O condicionamento térmico para arrefecimento na sala de teste foi realizado do dia 23 de outubro até o dia 11 de novembro de 2014, sem o ar condicionado na sala de referência para fins comparativos de consumo de energia elétrica. Este experimento teve como objetivo a observação do comportamento térmico na sala de referência sob as condições naturais.

A figura 6.28 apresenta as temperaturas iniciais do experimento para arrefecimento, os dados foram coletados no dia 23 de outubro.

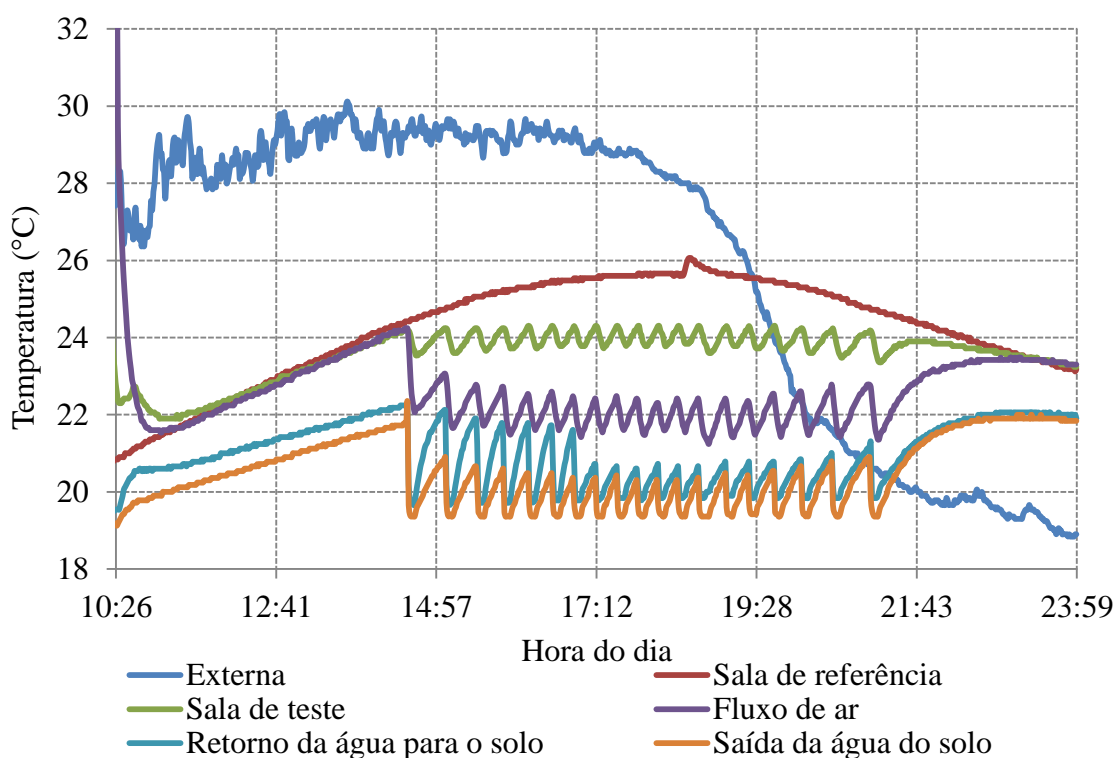


Figura 6.28 - Temperaturas do dia 23 de outubro de 2014

A figura 6.29 apresenta o gráfico das temperaturas do período de 23 de outubro a 04 de novembro de 2014. A temperatura de controle do condicionador geotérmico foi programada para 24 °C.

No dia 29 de outubro às 14h00m, a temperatura externa atingiu 39 °C e às 18h14m, a temperatura máxima na sala de referência atingiu 31,24 °C. Na sala de teste, o

condicionador geotérmico manteve o ambiente condicionado e a temperatura máxima foi de 25,78 °C, com uma diferença de 5,46 °C entre as duas salas no horário de máxima carga térmica. A figura 6.30 apresenta o gráfico das temperaturas do dia 29 de outubro de 2014.

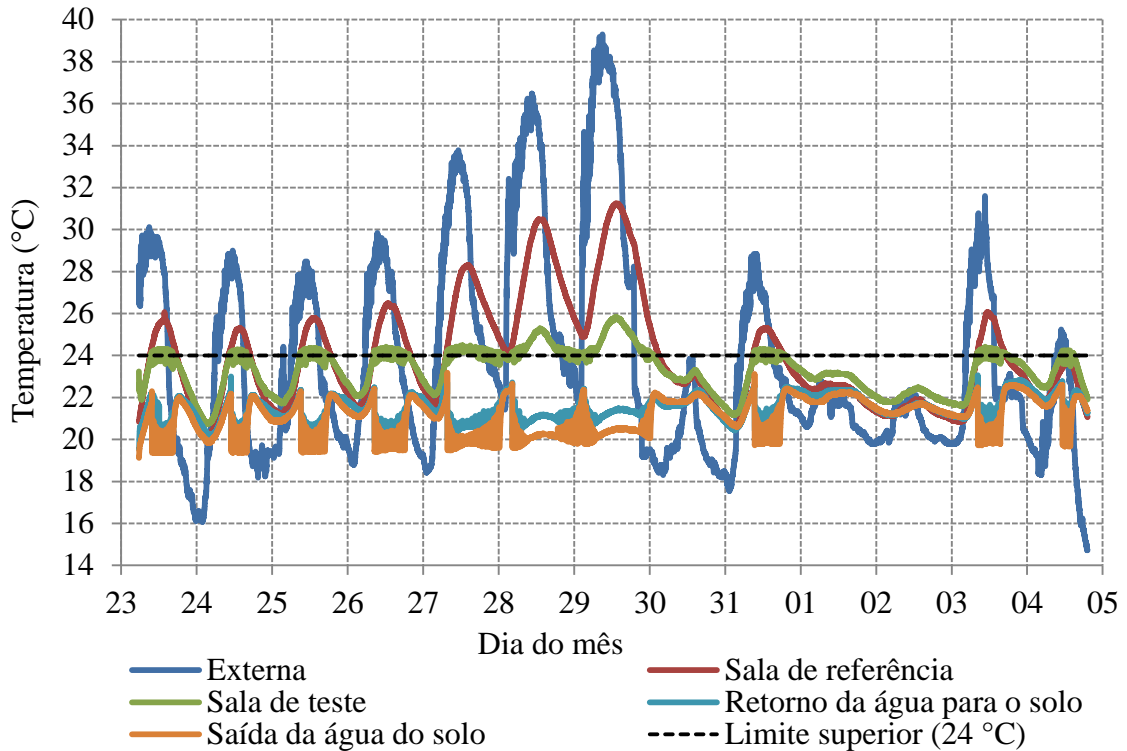


Figura 6.29 - Temperaturas dos dias de 23 de outubro a 04 de novembro de 2014

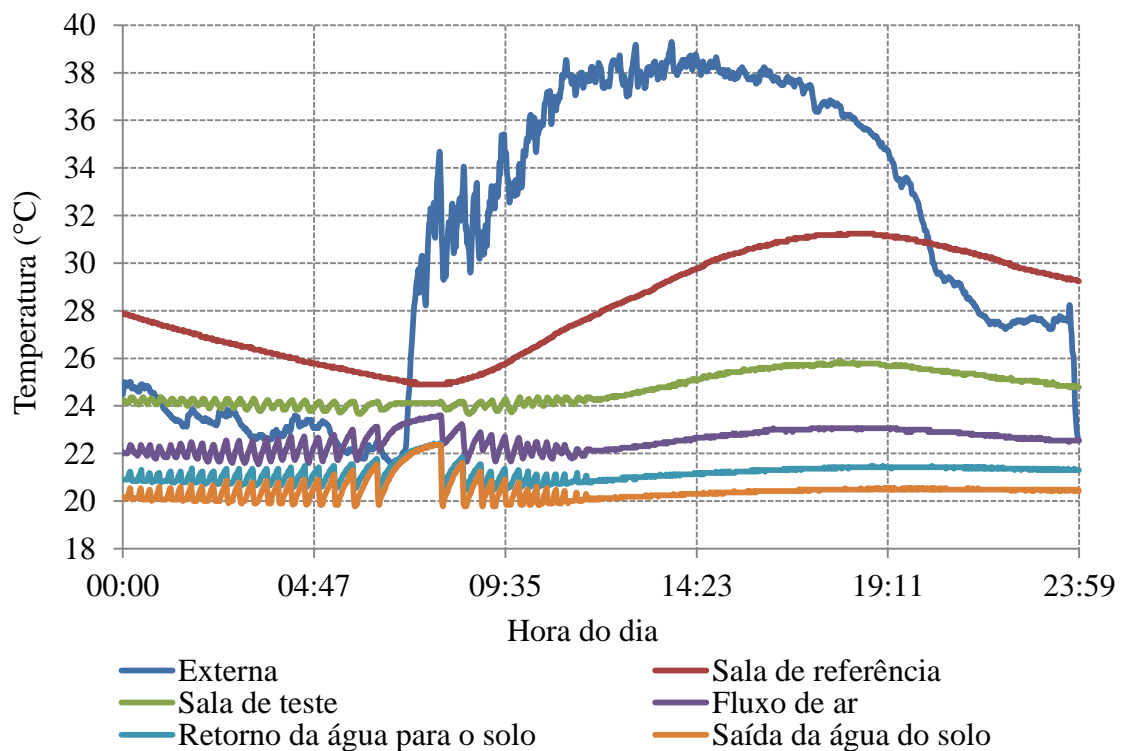


Figura 6.30 - Temperaturas do dia 29 de outubro de 2014

A figura 6.31 apresenta o gráfico das temperaturas do período de 06 a 11 de novembro de 2104.

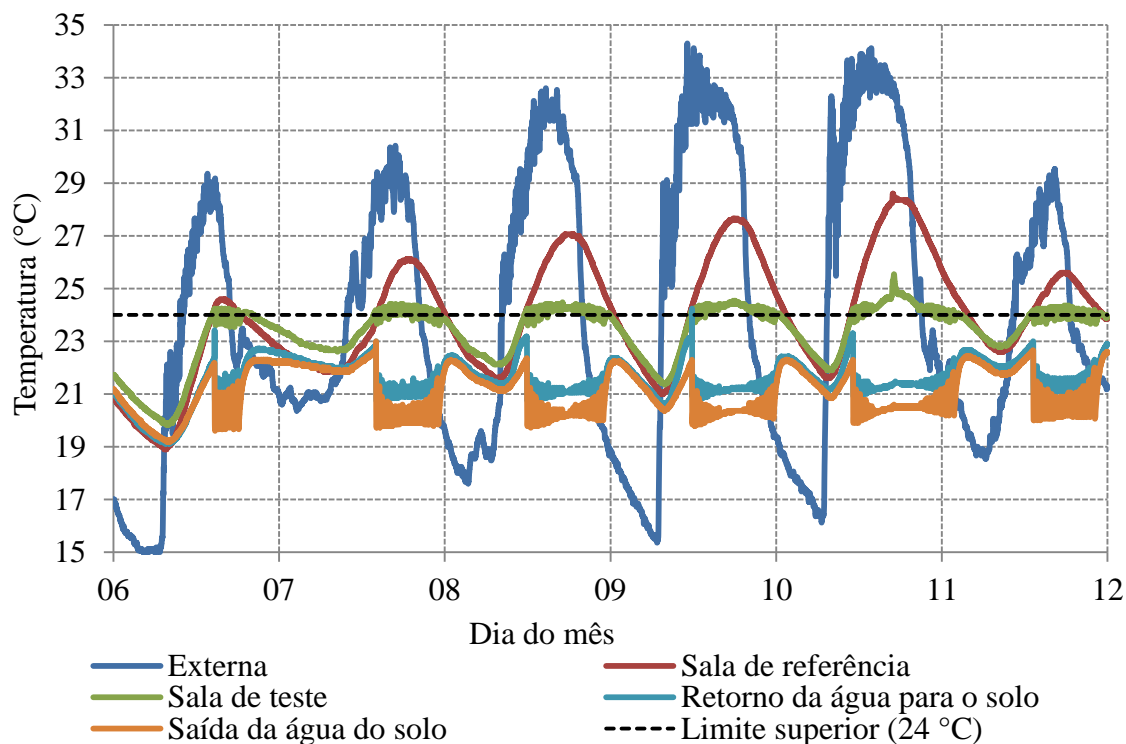


Figura 6.31 - Temperaturas dos dias de 06 a 11 de novembro de 2014

6.4.2.2 Comparação do consumo de energia elétrica entre o condicionador geotérmico e o convencional

O teste comparativo entre o condicionador geotérmico e o ar condicionado para arrefecimento da sala de testes e a de referência, respectivamente, começou no dia 13 de novembro de 2014 e terminou no dia 28 de fevereiro de 2015. A figura 6.32 apresenta os dados de temperaturas do dia 13 ao dia 22 de novembro de 2014.

No dia 20 de novembro houve problemas com a placa de aquisição de dados e foram perdidos os dados referentes à temperatura externa, retorno e saída de água do solo e também das temperaturas da sala de teste e da sala de referência. Os valores referentes às temperaturas da sala de teste e da sala de referência foram capturados pela placa de aquisição de dados do controle do ar condicionado e inseridos no espaço referente. A figura 6.33 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

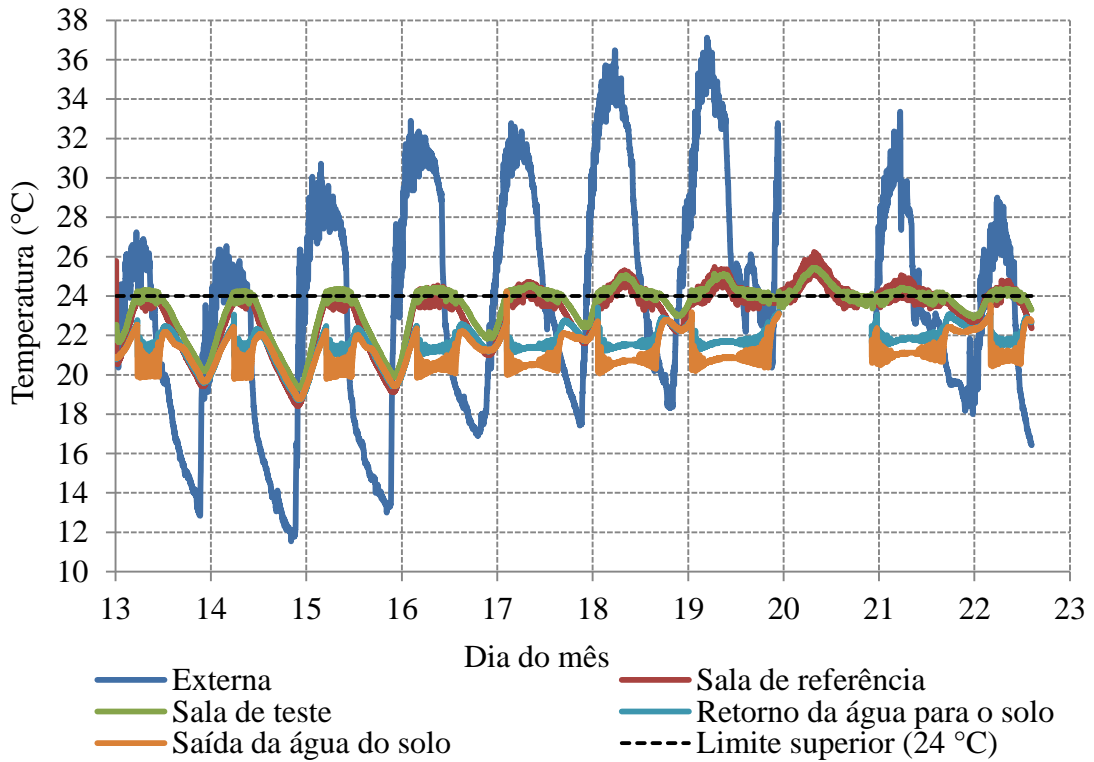


Figura 6.32 - Temperaturas dos dias de 13 a 22 de novembro de 2014

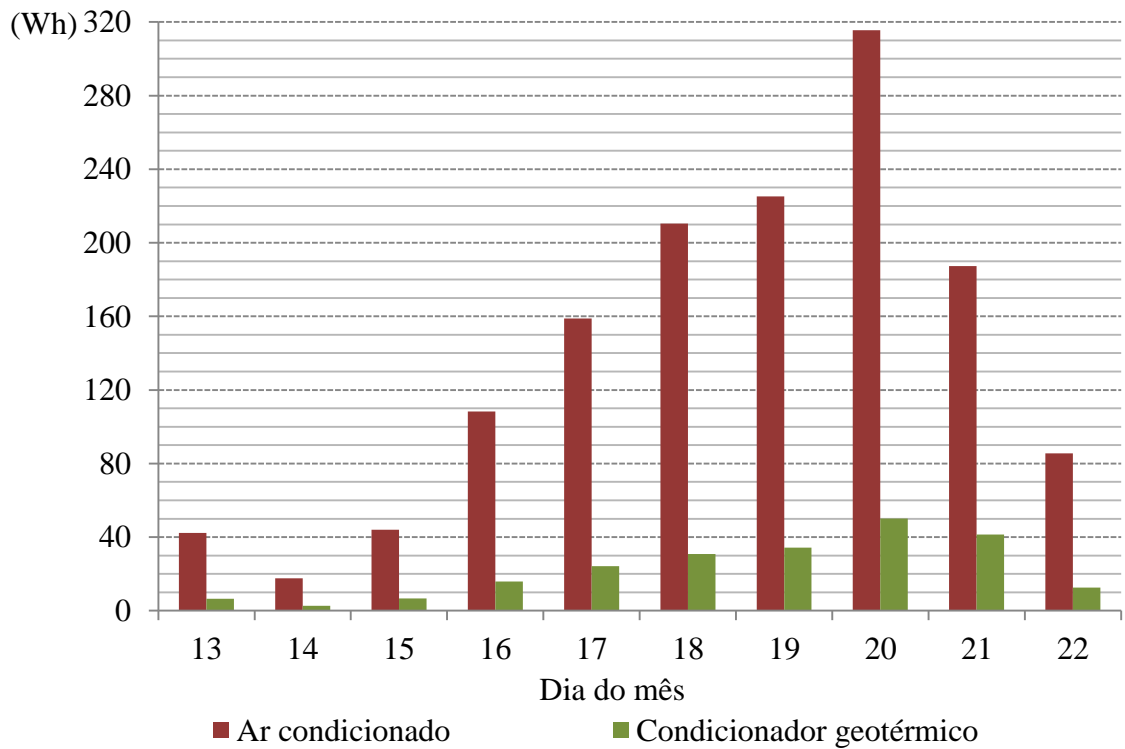


Figura 6.33 - Consumo de energia elétrica dos dias de 13 a 22 de novembro de 2014

A figura 6.34 apresenta os dados de temperaturas do dia 23 ao dia 30 de novembro de 2014 e a figura 6.36 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

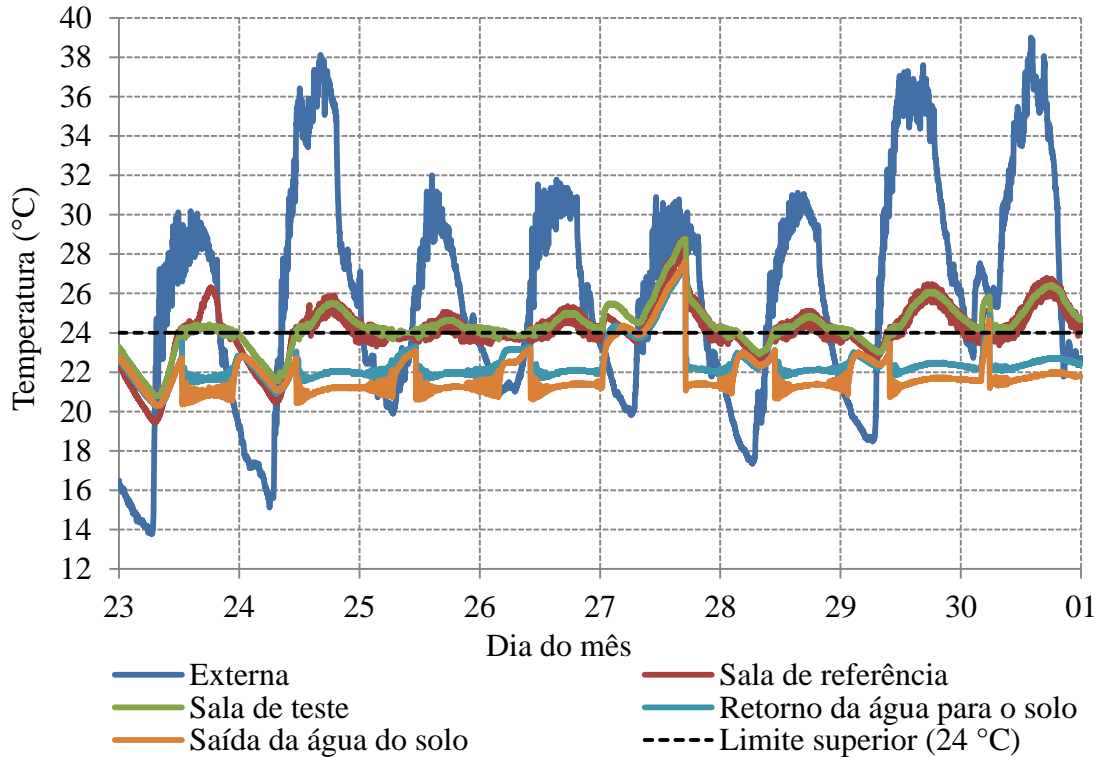


Figura 6.34 - Temperaturas dos dias de 23 a 30 de novembro de 2014

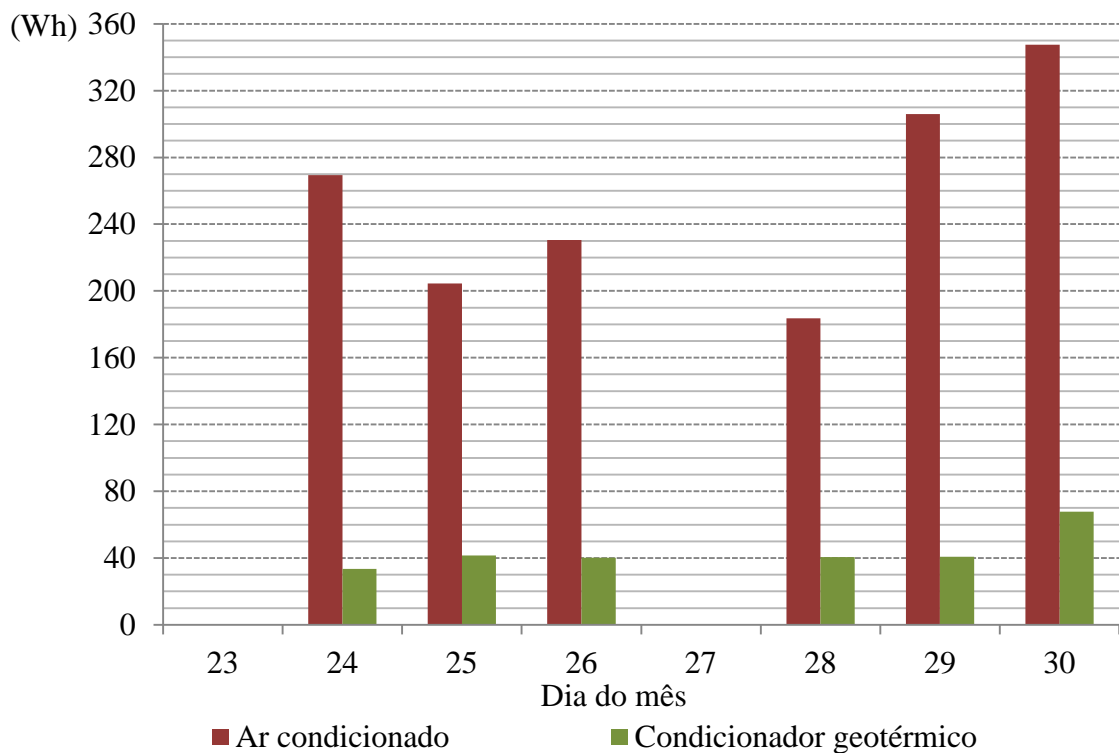


Figura 6.35 - Consumo de energia elétrica dos dias de 23 a 30 de novembro de 2014

No dia 27 de novembro houve um problema com o controle eletrônico, a alimentação da bomba hidráulica a partir de 00h20m até as 17h03m não funcionou de acordo com o programado, operando com uma potência elétrica abaixo do necessário, tornando o sistema de condicionamento geotérmico inoperante. A partir das 17h04m o controle voltou à normalidade e o problema não voltou a se repetir, tornando impossível a verificação da origem deste mau funcionamento. Este fato pode ser visto na figura 6.36 e os dados correspondentes na tabela 6.3, aonde se observa que a mudança da corrente de consumo da bomba hidráulica de 0,7 A para 1,7 A, demonstra a passagem do estado de não funcionamento para o estado de funcionamento, comprovando a importância do controle HCC.

Tabela 6.3 – Valores de alimentação do condicionador geotérmico

ventilador		bomba hidráulica		hora	potência
tensão	corrente	tensão	corrente		
15,63	3,05	14,04	0,71	16:50	57,67
15,63	3,11	14,02	0,71	16:51	58,47
15,63	3,06	14,04	0,71	16:52	57,87
15,60	3,15	14,04	0,71	16:53	59,11
15,60	3,19	14,04	0,68	16:54	59,35
15,60	3,13	14,06	0,64	16:55	57,81
15,60	3,15	14,02	0,70	16:56	59,01
15,60	3,15	14,04	0,68	16:57	58,66
15,63	2,98	14,06	0,66	16:58	55,74
15,63	3,03	14,09	0,64	16:59	56,30
15,60	3,14	14,04	0,64	17:00	58,00
15,63	3,07	14,02	0,70	17:01	57,87
15,63	2,93	14,02	0,73	17:02	56,00
15,65	2,98	13,99	0,79	17:03	57,78
15,53	3,15	13,56	1,69	17:04	71,85
15,55	3,04	13,51	1,76	17:05	71,10
15,48	3,31	13,44	1,79	17:06	75,41
15,53	3,03	13,54	1,71	17:07	70,25
15,50	3,24	13,51	1,74	17:08	73,71
15,55	3,15	13,49	1,85	17:09	73,82
15,53	3,13	13,42	1,88	17:10	73,73
15,53	3,24	13,54	1,75	17:11	74,01
15,53	3,11	13,51	1,75	17:12	71,86
15,53	3,05	13,46	1,80	17:13	71,66
15,50	3,009	13,44	1,85	17:14	71,45
15,50	3,074	13,51	1,73	17:15	71,01

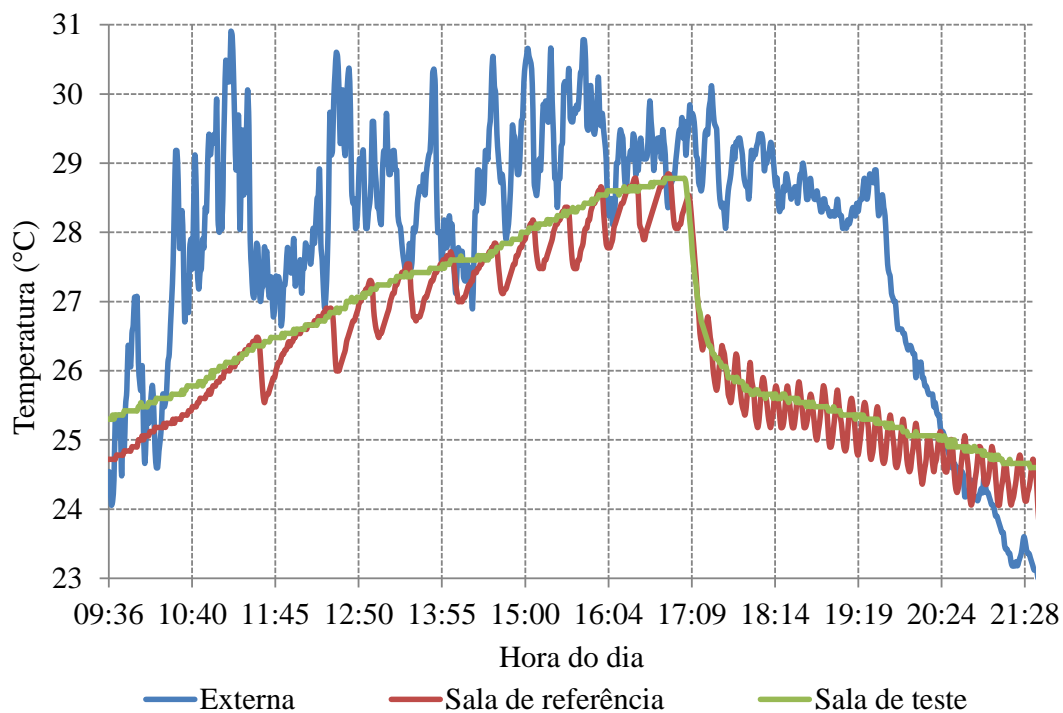


Figura 6.36 - Temperaturas do dia 27 de novembro de 2014

No dia 01 de dezembro de 2014 a temperatura de controle foi alterada para 25 °C, e no dia 08 de dezembro, a temperatura externa atingiu 40 °C. A sala condicionada geotermicamente se manteve próximo de 26 °C, como pode ser visto na figura 6.37.

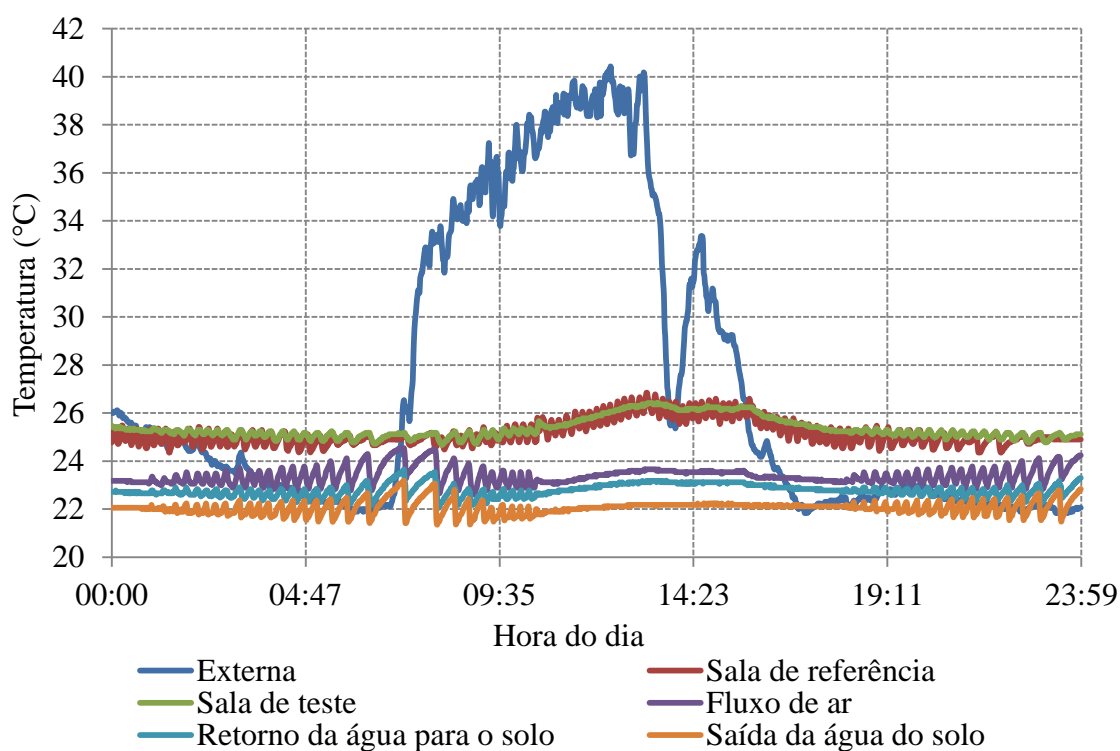


Figura 6.37 - Temperaturas do dia 08 de dezembro de 2014

A figura 6.38 apresenta os dados de temperaturas do dia 01 ao dia 15 de dezembro de 2014 e a figura 6.39 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

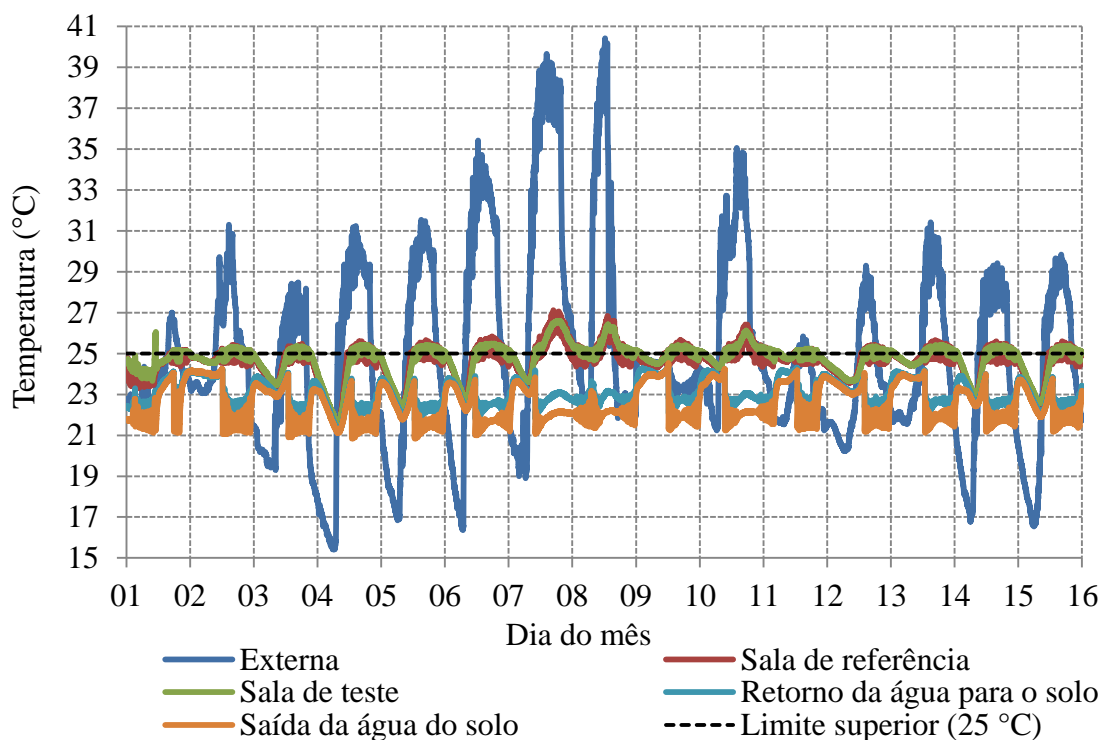


Figura 6.38 - Temperaturas dos dias de 01 a 15 de dezembro de 2014

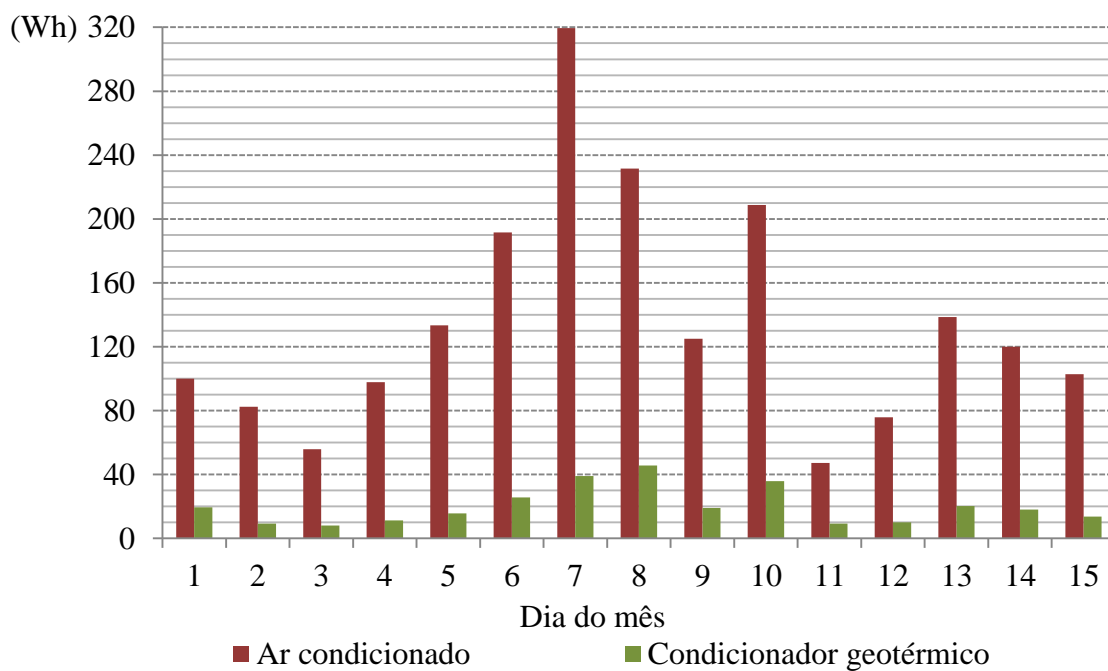


Figura 6.39 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 15 de dezembro de 2014

A figura 6.40 apresenta os dados de temperaturas do dia 16 ao dia 31 de dezembro de 2014 e a figura 6.41 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

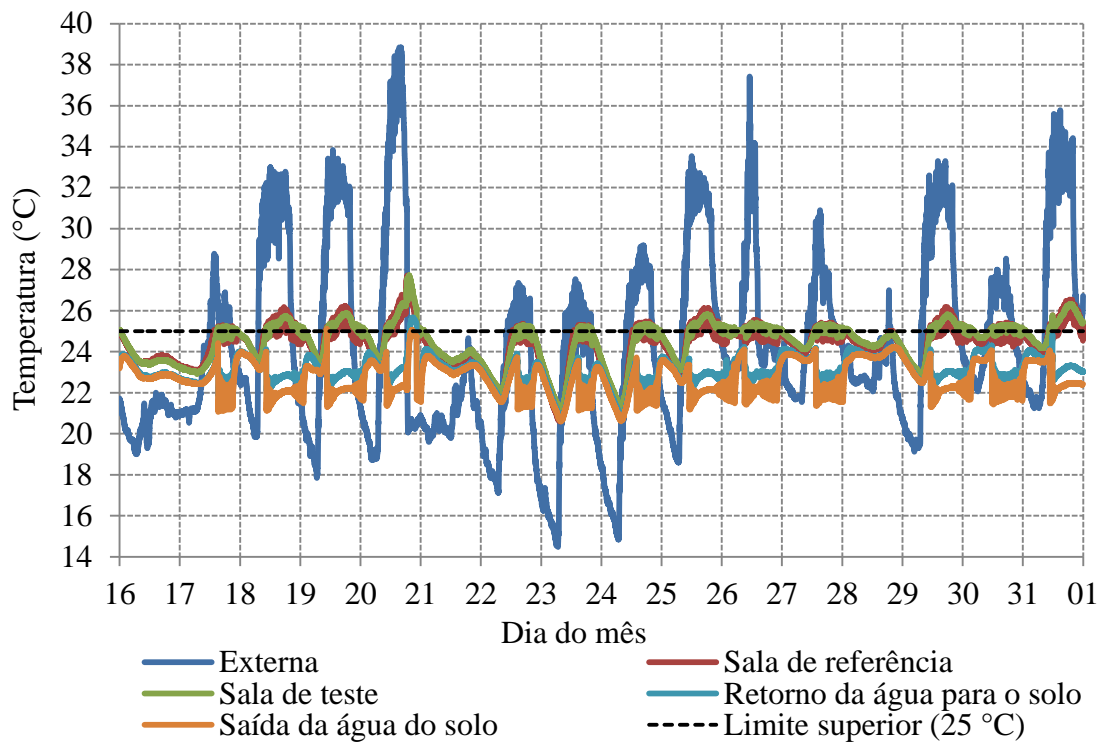


Figura 6.40 - Temperaturas dos dias de 16 a 31 de dezembro de 2014

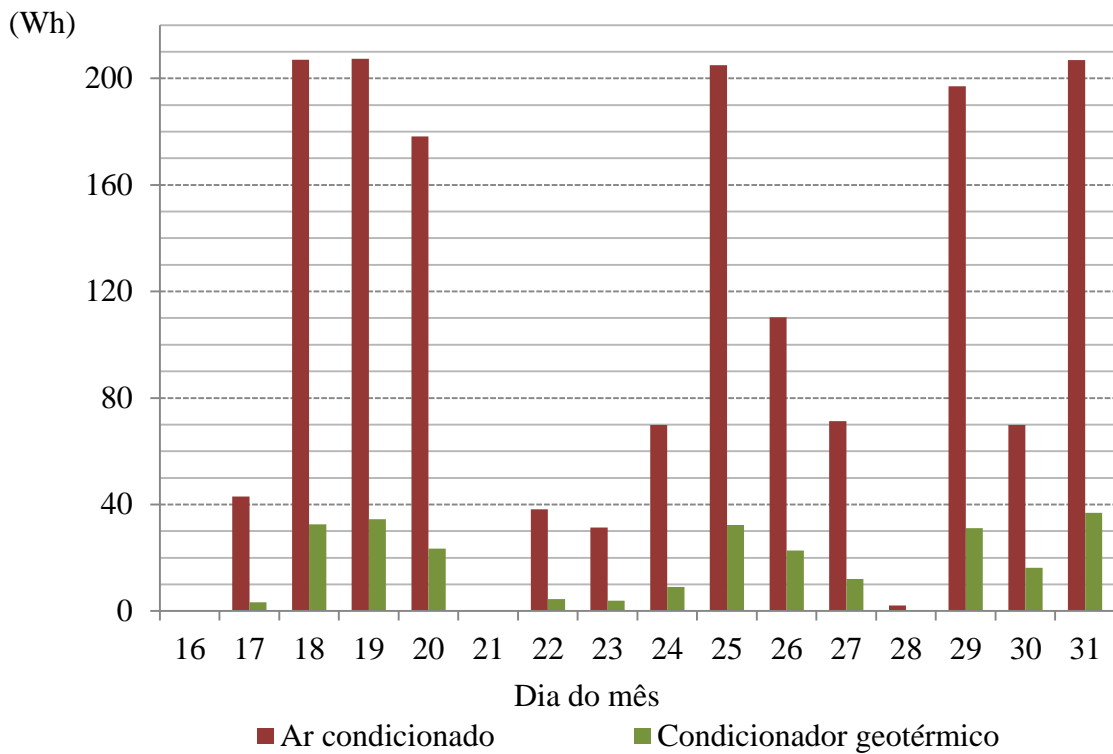


Figura 6.41 - Consumo de energia elétrica dos dias de 16 a 31 de dezembro de 2014

A figura 6.42 apresenta os dados de temperaturas do dia 01 ao dia 15 de janeiro de

2015 e a figura 6.43 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento. A partir do mês de janeiro observa-se que o condicionador geotérmico começou a perder eficiência, devido à saturação do solo causado pela quantidade inferior de mangueiras e a amplitude das temperaturas em função da profundidade do solo, conforme abordado no capítulo 3 desta dissertação e exemplificado na figura 3.2 deste capítulo.

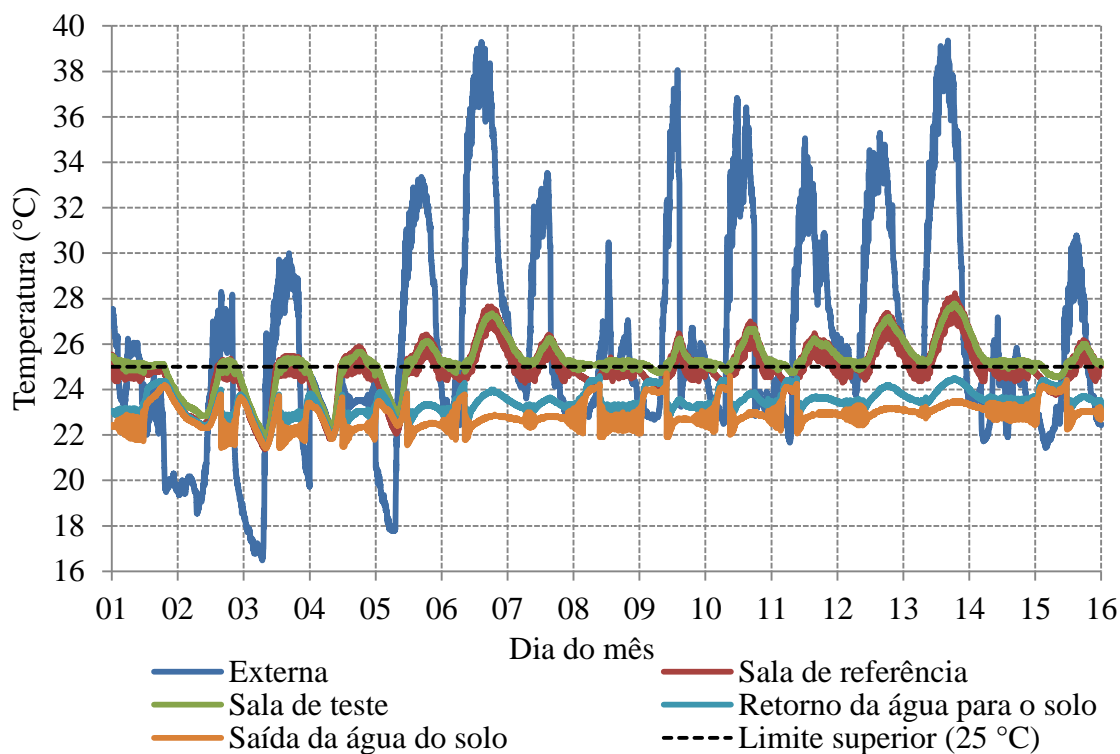


Figura 6.42 - Temperaturas dos dias de 01 a 15 de janeiro de 2015

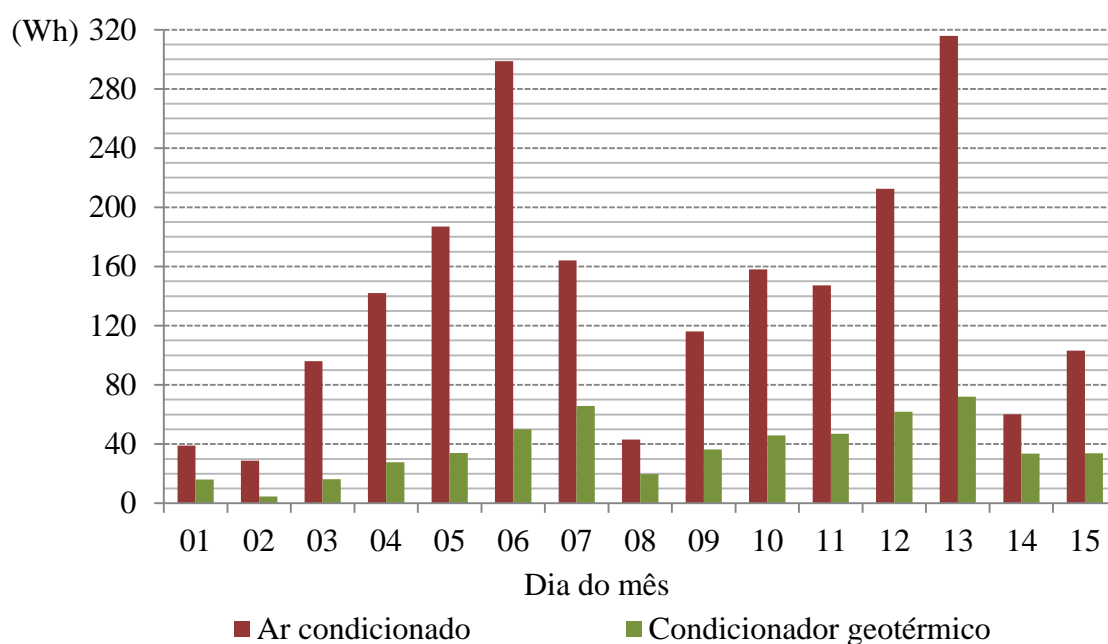


Figura 6.43 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 15 de janeiro de 2015

A figura 6.44 apresenta os dados de temperaturas do dia 16 ao dia 31 de janeiro de 2015 e a figura 6.45 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

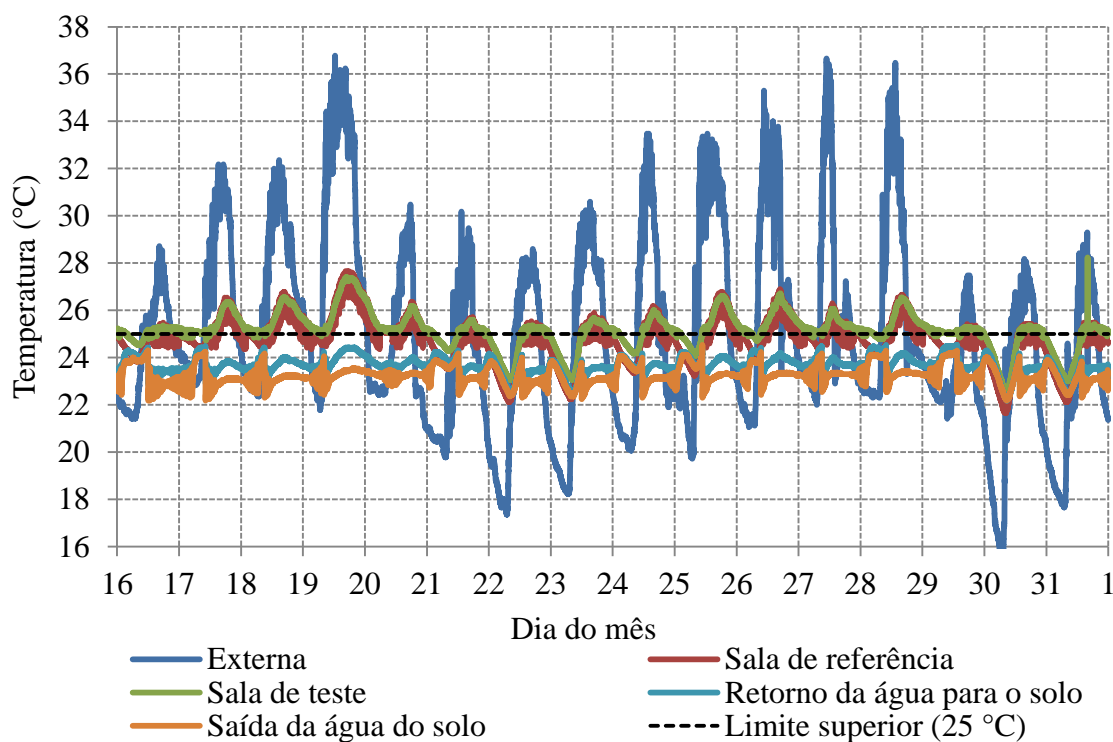


Figura 6.44 - Temperaturas dos dias de 16 a 31 de janeiro de 2015

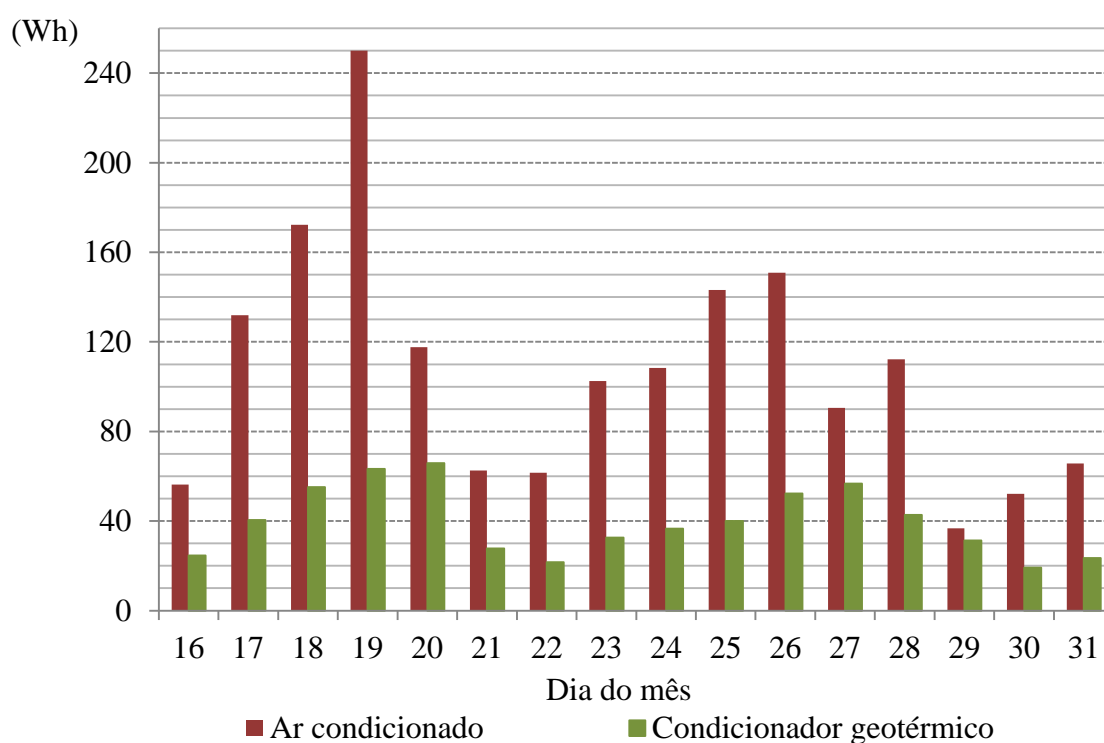


Figura 6.45 - Consumo de energia elétrica dos dias de 16 a 31 de janeiro de 2015

A figura 6.46 apresenta os dados de temperaturas do dia 01 ao dia 14 de fevereiro de 2015 e a figura 6.47 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

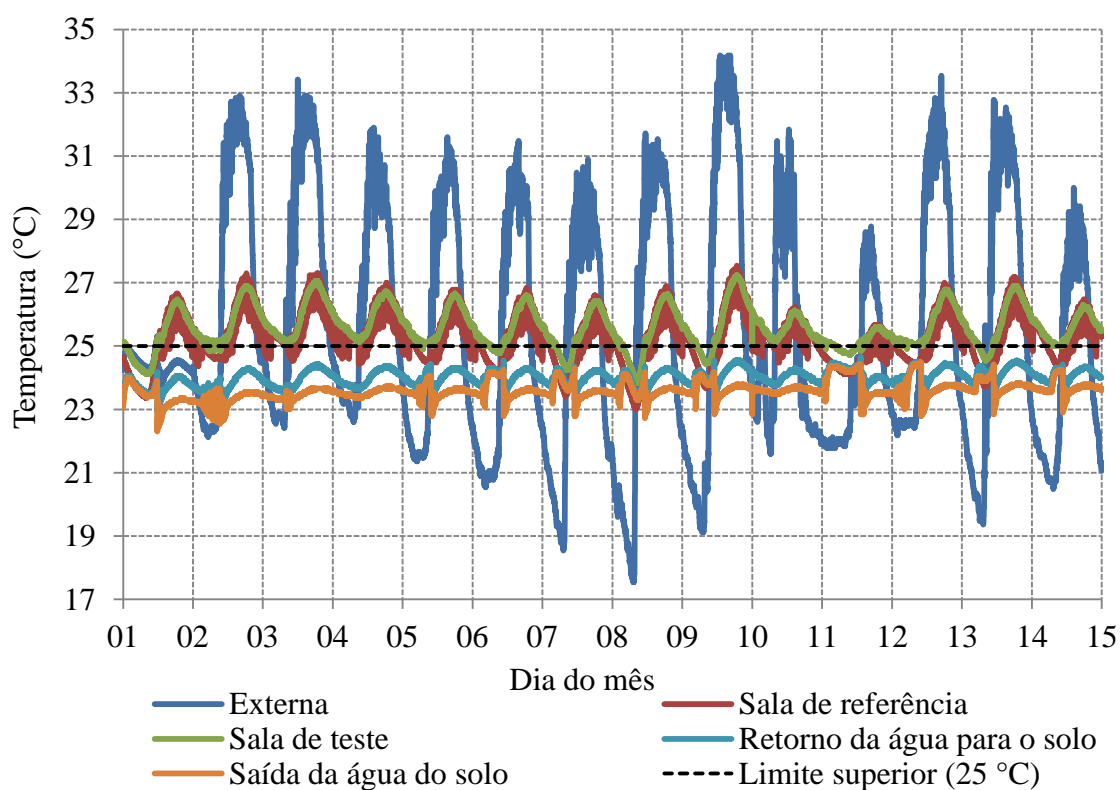


Figura 6.46 - Temperaturas dos dias de 01 a 14 de fevereiro de 2015

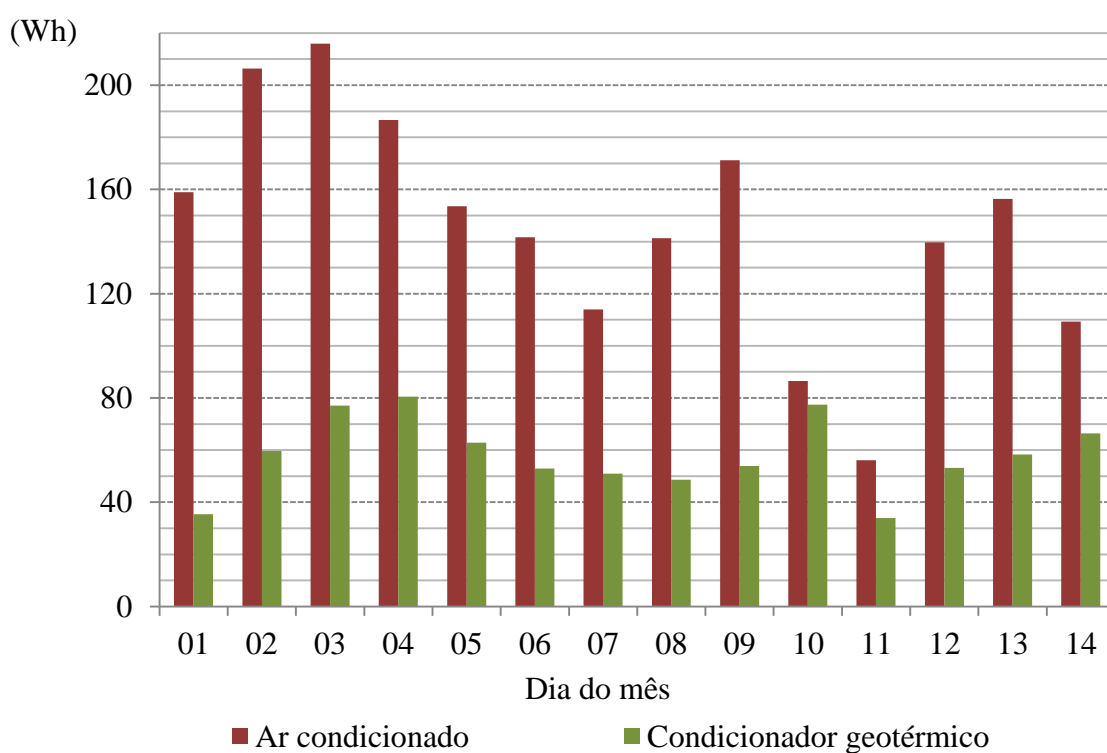


Figura 6.47 - Consumo de energia elétrica dos dias de 01 a 14 de fevereiro de 2015

A figura 6.48 apresenta os dados de temperaturas do dia 15 ao dia 28 de fevereiro de 2015 e a figura 6.49 apresenta o consumo de energia elétrica diário de cada equipamento.

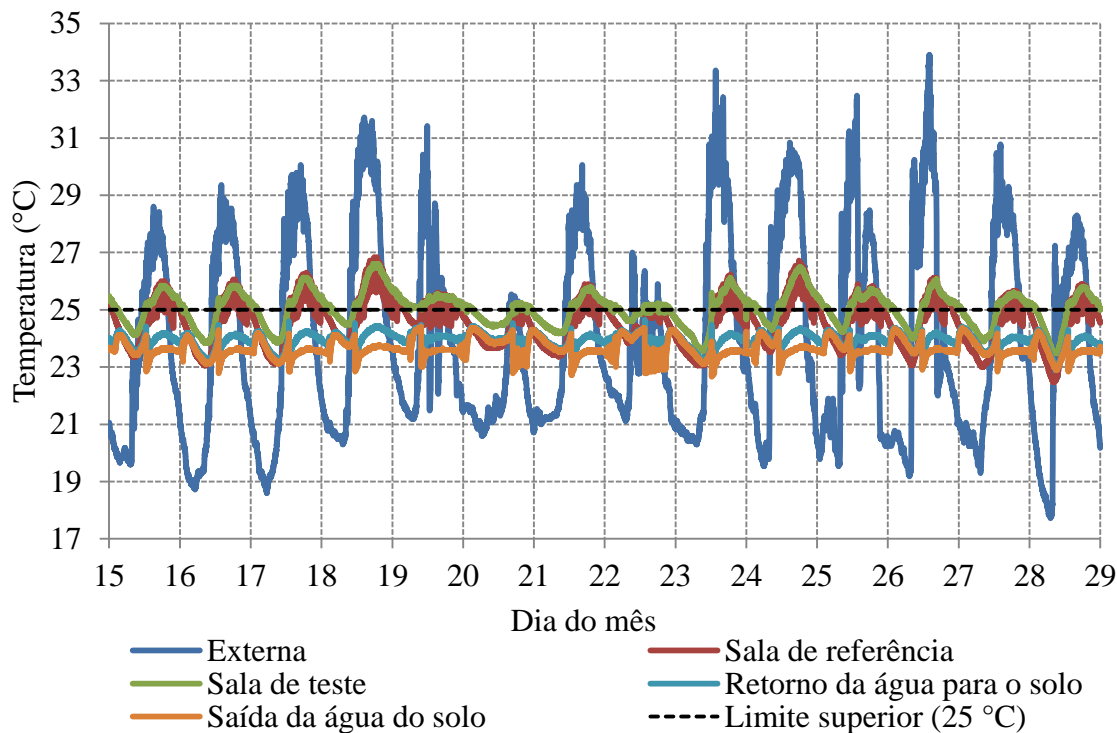


Figura 6.48 - Temperaturas dos dias de 15 a 28 de fevereiro de 2015

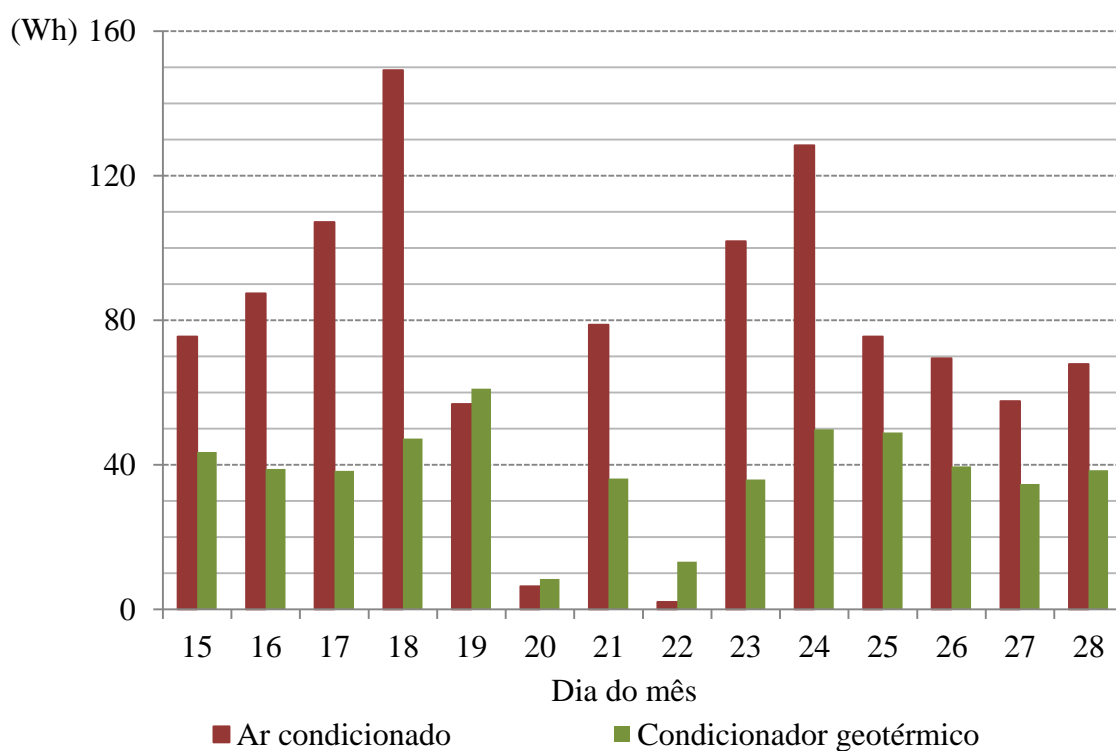


Figura 6.49 - Consumo de energia elétrica dos dias de 15 a 28 de fevereiro de 2015

6.4.2.3 Resultados parciais do consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico e do convencional para arrefecimento

Do dia 23 de outubro de 2014 ao dia 28 de fevereiro de 2015 foram armazenados os dados de consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico e do ar condicionado.

Apesar do baixo rendimento nos meses de janeiro e fevereiro, o condicionador geotérmico consumiu 3,37 kWh para manter a sala de testes condicionada nas condições experimentadas neste trabalho durante este intervalo de tempo. O ar condicionado consumiu 12,57 kWh para realizar a mesma tarefa. O condicionador geotérmico consumiu menos de 26,8% da energia elétrica necessária para manter a sala de referência nas mesmas condições térmicas da sala de teste. A figura 6.50 apresenta o resultado final de consumo de energia elétrica dos equipamentos durante o verão de 2015.

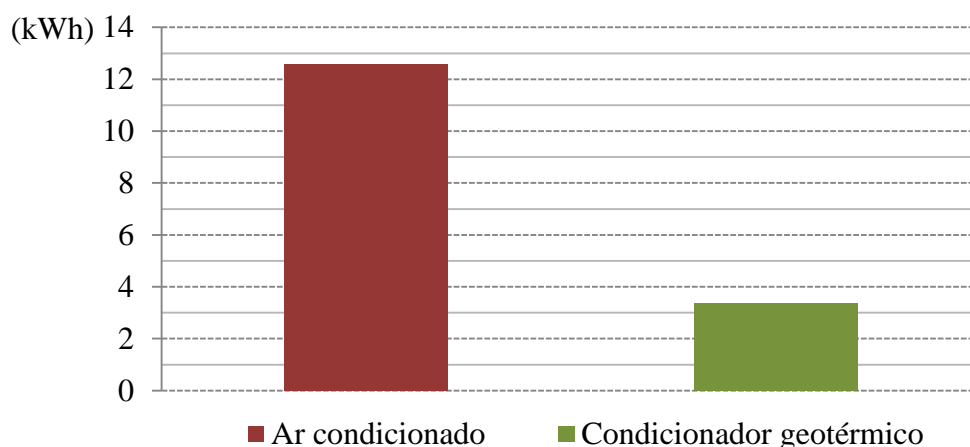


Figura 6.50 - Consumo de energia elétrica de 23 de novembro de 2014 a 28 de fevereiro de 2015

6.4.2.4 Temperatura média em cada sala durante o verão de 2014 - 2015

A temperatura média na sala de referência foi de 24,62 °C, e na sala de teste foi de 24,87 °C. A diferença de temperatura entre as duas salas foi de 0,25 °C, como pode ser visto na figura 6.51.

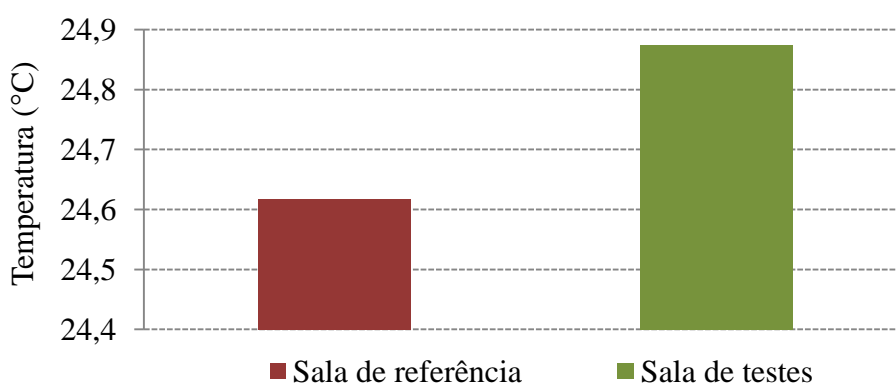


Figura 6.51 - Temperatura média de 23 de novembro de 2014 a 28 de fevereiro de 2015

6.4.2.5 Resultados finais comparativos do condicionador geotérmico e do convencional

Durante os períodos de inverno e verão, o ar condicionado convencional consumiu 19,08 kWh e o condicionador geotérmico consumiu 4,65 kWh de energia elétrica, aproximadamente 24% do consumo do ar condicionado convencional para executar a mesma tarefa. A figura 6.52 apresenta os resultados finais do consumo de energia elétrica de ambos os equipamentos.

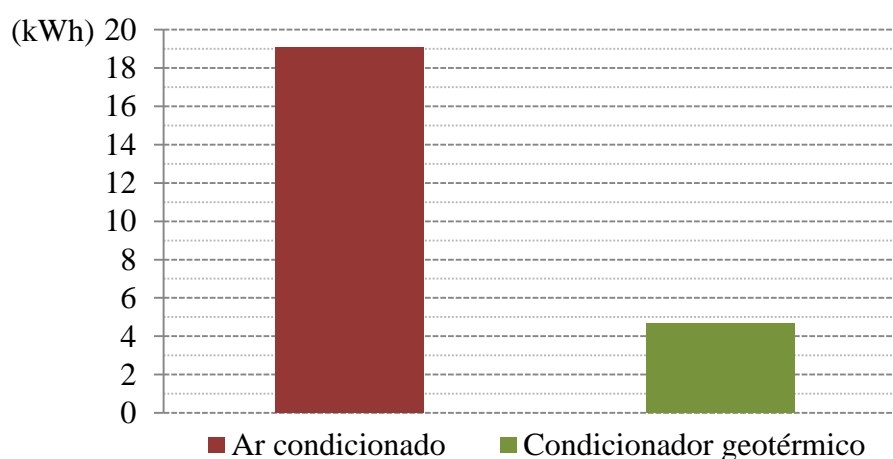


Figura 6.52 - Consumo de energia elétrica total

6.5 Perspectivas de aplicação no sistema elétrico nacional

Para demonstrar qual seria o impacto que o condicionamento geotérmico de residências provocaria no consumo de energia no sistema elétrico brasileiro, fez-se uma extrapolação hipotética de quanto se poderia economizar substituindo os atuais aparelhos de ar condicionado pelo geotérmico. Segundo a (EPE [38]), o consumo total nacional de energia elétrica atendido por meio da rede atingiu no ano de 2013 a marca de 454.436 GWh/ano. Deste total, 121.167 GWh/ano foi a demanda residencial, sendo que 22% deste consumo se deu pelo uso de ar condicionado, representando assim um consumo de 26.656,74 GWh/ano para conforto térmico.

Na média, cada residência brasileira consome com condicionamento térmico 32 kWh/mês. Para realizar uma estimativa de consumo que o condicionamento geotérmico representaria para o sistema elétrico brasileiro, considerou-se para esta análise como referência o custo do kWh da concessionária AES-Sul (valor em vigor no mês de fevereiro de 2015) que foi de R\$ 0,4139 acrescido de 25% de ICMS e 5% de PIS/Cofins. Para simplificar a análise, o custo médio mensal no Brasil com ar condicionado foi de R\$ 18,13. Como mostra o capítulo 6 deste trabalho, o consumo do condicionador geotérmico é 1/4 menor em relação

ao condicionador de ar convencional. No caso de cada residência adotar o condicionamento geotérmico, o consumo médio se reduziria para R\$ 4,53 por mês, proporcionando uma economia de R\$ 13,60. Ainda supondo que todas as residências adotassem o condicionador geotérmico, e que a redução do consumo com condicionamento térmico fosse reduzido à quarta parte dos 22% gastos em ar condicionado, a redução de consumo de energia elétrica no país seria de 20.000 GWh/ano, o que representa uma redução de 16,5% do consumo total residencial, ou 4,4% do consumo total anual do país.

A região sul do Brasil possui 8,727 milhões de clientes residenciais, com um consumo médio de 178,5 kWh/mês, segundo informa (*EPE, [1]*). Isto representa um consumo de 1.557,77 GWh/mês, sendo que 342,7 GWh/mês são consumidos com conforto térmico. Pelas características geográficas, a região sul tem possibilidade plena de adotar o condicionamento geotérmico, o que implicaria em uma redução de consumo em energia elétrica na ordem de 257 GWh/mês.

Como termo de comparação, conforme (*ITAIPU BINACIONAL [40]*), a Central Hidrelétrica de Itaipu forneceu em 2013 a quantia de 98.630 GWh, a adoção da energia geotérmica para redução de consumo residencial apenas, seria o equivalente a 20% da produção desta hidrelétrica.

6.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais de temperatura e consumo de energia elétrica. O objetivo foi de se ter uma comparação do consumo de energia elétrica de um ambiente de teste condicionado com a energia geotérmica e com um ambiente de referência condicionado com um condicionador de ar, nas mesmas condições de temperatura do ambiente de teste. Também houve a comparação entre estes dois ambientes, sem o ar condicionado na sala de referência, com o objetivo de facilitar a visualização das variações térmicas no ambiente sem condicionamento.

No experimento realizado sem o gerenciamento eletrônico, verificou-se não ser possível definir uma vazão ideal do fluido na bomba hidráulica que encontrasse a melhor troca térmica possível com o solo, devido aos diferentes fatores envolvidos, que mudam de características dia após dia.

Quanto ao uso de um gerenciamento eletrônico constante, com verificação das variáveis envolvidas a cada 3 minutos, constatou-se um melhor aproveitamento da energia geotérmica acumulada no solo. O controle HCC além de aperfeiçoar as trocas térmicas

envolvidas, também contribuiu para um menor consumo de energia elétrica por parte do condicionador geotérmico.

Quanto à economia de energia elétrica, observa-se que o condicionamento geotérmico necessita apenas de um quarto do consumo do ar condicionado comum para desempenhar a mesma tarefa, o que representaria no sistema elétrico brasileiro uma redução do consumo residencial equivalente a 20% da produção da hidrelétrica de Itaipu.

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação descreve uma metodologia para a utilização da energia geotérmica como fonte de calor. Sabe-se que o subsolo possui uma capacidade apreciável e útil de armazenar calor ou frio e, portanto que a energia geotérmica seria uma solução viável para a economia de energia elétrica com o não uso do aparelho de ar condicionado convencional. Assim, o calor geotérmico pode representar uma solução viável para o condicionamento geotérmico de residências no futuro.

Uma característica distinta da proposta desta dissertação é que ao contrário de outros sistemas de condicionamento de ambientes, neste protótipo não há bomba de calor (ciclo de Carnot), o que reduz drasticamente o consumo de energia e desgastes de peças móveis de potência. Neste trabalho, utilizou-se apenas uma bomba hidráulica de baixa potência responsável pela circulação de água e um ventilador para circulação de ar em torno do trocador geotérmico de calor.

A análise dos resultados teóricos e experimentais indicam que o modelo de condicionamento geotérmico de ambientes proposto é viável tecnicamente, e a análise de viabilidade indica as regiões do país e suas situações peculiares, aonde este modelo se torna mais recomendável.

Os resultados práticos obtidos no laboratório do CEESP, na casa modelo, confirmam a modelagem realizada no capítulo 4, pois se aproximam da situação proposta nesta dissertação. A perda de 25% do trocador de calor enterrado no solo devido ao esmagamento de uma das mangueiras pelo trator que realizou o trabalho, deixou o trocador de calor subdimensionado para alguns testes práticos, conforme os cálculos realizados, mas não impediu a realização do trabalho. Detalhes deste dimensionamento inferior do trocador de calor podem ser observados nos dias de intensa troca térmica e nos meses finais do verão, onde o condicionamento geotérmico não suportou a carga térmica. Nestes casos a temperatura ultrapassou os limites estabelecidos, mas manteve-se dentro do limite de conforto térmico. Como consequência, acarretou uma considerável perda de rendimento, como pode ser observado nos meses de janeiro e fevereiro de 2015.

Os resultados desta dissertação apontam para a possibilidade de se manter um ambiente dentro dos limites de conforto térmico humano utilizando-se apenas a EGS, sem nenhuma máquina de calor que utiliza o ciclo de Carnot.

Quanto ao uso do gerenciamento eletrônico através do método HCC, este se mostrou fundamental, por encontrar o ponto próximo do ideal das trocas térmicas envolvidas. O

controle HCC também contribuiu para o baixo consumo de energia, ao diminuir ou parar o funcionamento da bomba hidráulica e do ventilador, quando não necessário. Nos meses de janeiro e fevereiro de 2015, pode-se ver nos gráficos que o consumo de energia elétrica do condicionador geotérmico aumentou consideravelmente, devido ao fato do controle HCC trabalhar no limite máximo, comprovando que este dispositivo de controle foi o responsável pelo baixo consumo de energia elétrica nos meses anteriores.

Durante os experimentos, verificou-se que a temperatura de saída da água do solo varia de acordo com a sazonalidade, dentro dos limites apontados no capítulo 3, comprovando a tendência à estabilização da temperatura do solo em um valor fixo relativo à média anual da temperatura ambiente no local de testes. Os testes indicaram que o subsolo tem capacidade térmica suficiente para suprir as trocas de calor, mas deve-se levar em conta uma margem de segurança no cálculo do trocador de calor geotérmico, para compensar deficiências provocadas por secas prolongadas ou calor mais intenso do que a média.

Há enormes benefícios no uso da energia geotérmica, especialmente em instalações residenciais, pois se trata de uma energia limpa que pode ser extraída da terra em praticamente qualquer local do mundo. No caso do Brasil, contribuindo para a redução do consumo de energia do sistema elétrico nacional. Neste trabalho houve uma redução na ordem de 80% do consumo de energia elétrica em comparação com o ar condicionado convencional. De acordo com o IGSHPA (*International Ground Source Heat Pump Association*), este é um dos mais eficazes sistemas de aquecimento e arrefecimento residenciais disponíveis hoje em dia. Enfim, este trabalho contribui para reduzir o consumo residencial, reduzindo a demanda por energia elétrica, tornando esta fonte de energia viável para o uso residencial e de pequenas empresas.

Como desvantagens do condicionamento geotérmico de residências pode-se citar a dependência dos limites de controle de temperatura à média anual das temperaturas do local.

7.1 Principais contribuições

Os resultados apresentados nesta dissertação contribuem nos seguintes aspectos:

- 1) Desenvolvimento dos comandos de eletrônica de potência e controle para utilização da energia geotérmica superficial;
- 2) Desenvolvimento de uma metodologia para estimação das trocas de calor entre o subsolo e o ambiente habitável, para que o dimensionamento correto das mangueiras a serem enterradas no subsolo seja capaz de suprir a demanda dos demais componentes de troca de calor;

- 3) Análise de viabilidade técnica da energia geotérmica superficial na maioria das regiões do Brasil;
- 4) Viabilização da energia geotérmica superficial para condicionamento térmico de ambientes habitados, sem o uso de bombas de calor, com a finalidade de reduzir o consumo de energia elétrica;
- 5) Estabelecimento de um controlador HCC para otimizar as trocas térmicas entre o subsolo e o ambiente condicionado.

7.2 Trabalhos futuros

Dentre os trabalhos futuros que podem ser realizados baseados nos resultados desta dissertação podem ser citados:

- 1) uso de coletores solares para captar a radiação solar incidente e a geração térmica, armazenando no solo uma temperatura mais quente do que a média;
- 2) uso da energia solar para resfriamento do fluido circulante, armazenando esta temperatura mais fria do que a média, no solo;
- 3) aperfeiçoamento do controle eletrônico das trocas térmicas, minimizando as oscilações verificadas no entorno do ponto ótimo, devido ao uso do passo fixo no controle HCC;
- 4) análise de viabilidade mais detalhada, com objetivo de identificar as situações em que este modelo mais se enquadra;
- 5) análise do impacto causado pela redução da demanda por energia elétrica através de condicionamento térmico, no sistema brasileiro;
- 6) redimensionamento otimizado dos trocadores de calor do subsolo e do ambiente condicionado e melhorar o aproveitamento das valas com as mangueiras geotérmicas.

PUBLICAÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

1. De Nardin, C.R. et al. **Reduction of electrical load for air conditioning by electronically controlled geothermal energy.** Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Vienna, Austria. DOI: [10.1109/IECON.2013.6699413](https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699413), 2013
2. Fernandes, F.T. et al. **Improved analytical solution to obtain the MPP of PV modules.** Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Vienna, Austria. DOI: [10.1109/IECON.2013.6699384](https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699384), 2013
3. De Nardin, C.R. et al. **Underground Geothermal Energy to Reduce the Residential Electricity Consumption.** Renewable Power Generation, RPG 2014 - 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG™) IET, Naples, Italy. DOI: [10.1049/cp.2014.0933](https://doi.org/10.1049/cp.2014.0933), 2014
4. Fernandes, F.T. et al. **PV Efficiency Improvement by Underground Heat Exchanging and Heat Storage.** Renewable Power Generation, RPG 2014 - 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG™) IET, Naples, Italy. DOI: [10.1049/cp.2014.0875](https://doi.org/10.1049/cp.2014.0875), 2014
5. Longo A. J. et al. **Instrumentation for Surface Geothermal Data Acquisition Aiming at Sustainable Heat Exchangers.** Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, Dallas, TX – USA. DOI: [10.1109/IECON.2014.7048797](https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048797), 2014

BIBLIOGRAFIA

- [1] EPE, Anuário estatístico de energia elétrica 2013.
- [2] Nota técnica DEA 14/10, Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019) – EPE, 2010.
- [3] Geotics. **Geotermia Solar, Equipo y Funcionamiento**. Disponível em: <<http://www.geotics.net/espanol/energia-geotermia/intercambio-tierra>>. Acesso em: set. de 2014.
- [4] Palz, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1981.
- [5] Ogura, M. et al. **Alimentação de sistemas de Telecomunicações através da energia solar**. Disponível em: <http://www.mackenzie.br/fileadmin/Graduacao/EE/Revista_on_line/alimentacao_telecomunicacoes.pdf> Acesso em: 18 de set. de 2014.
- [6] NASA, **National Aeronautics and Space Administration**. Disponível em: <http://science-edu.larc.nasa.gov/energy_budget/pdf/Energy_Budget_Poster_3.pdf>. Acesso em: 18 de set. de 2014.
- [7] Florides, G. et al. **Annual Ground Temperature Measurements at Various Depths**. Higher Technical Institute, Paper reference code: 112s.
- [8] Kasuda, T. et al. **Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States**. ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1, 61 - 75, 1965.
- [9] Williams, A. L. Jr. et al. **Air Conditioning Earth Coupled Water Source Heat Pumps – Closed and Open Loop Systems**. disponível em: <http://www.texas-geology.com/AC_%20Earth_Coupled_Heat_Pumps.html>. Acesso em: set. de 2014.
- [10] Farret, F.A. et al. **Integration of Alternative Sources of Energy**. Ed. IEEE, Nova Iorque, EUA, 2006.
- [11] Çengel, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. Editora Mcgraw-Hill, São Paulo. Terceira Edição, 902 P., 2009.
- [12] Reichert, J.M. et al. **Fundamentos da ciência do solo**. UFSM, 2007.
- [13] Johansen, O. **Thermal conductivity of soils**. U.S. Army 1977 PhD Thesis.
- [14] Smerdon J. E. et al. **Air-ground temperature coupling and subsurface propagation of annual temperature signals**. Journal of geophysical research, Vol. 109, D21107, doi:10.1029/2004JD005056, 2004.

- [15] Lopes, F. S. M. E. **Dimensionamento de um Permutador de Calor Terra-Ar e Avaliação de Impacto na Climatização de um Edifício.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), IST, Lisboa, 2012.
- [16] Midttømme, K. et al. **Ground-Source Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage: Energy for the future.** NGU Special Publication, pp. 93-98, 2008.
- [17] dos Santos, R. C.; Viswanadham, Y. **Difusividade Térmica do Solo na Região Amazônica.**
- [18] Tavares J. C. **Integração de Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas em Edifícios** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, 2011.
- [19] Carvalho J. J. C. **Dimensionamento de Conduas Enterradas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- [20] Schulz, E. et al. **Eficiência no Uso de Tubos Enterrados Para Ventilação de Residências.** XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial, ID-36.
- [21] Musskopf D. B. **O uso de tubos enterrados para ventilação de residências.** (Dissertação Mestrado em Engenharia Civil), UFRGS, 2006.
- [22] Hamza, V. M. et al. **Status Report on Geothermal Energy Developments in Brazil.** World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- [23] Fernandes, F. T. **Aumento da Eficiência de Painéis Fotovoltaicos Com Esfriamento Por Energia Geotérmica e Aquecimento de Água.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- [24] Longo, A. J. **Instrumentação Eletrônica Para Levantamento de Dados do Perfil Geotérmico Superficial Visando a Troca Sustentável de Calor.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- [25] INMET **Instituto Nacional de Meteorologia.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em: out. de 2014.
- [26] State of Maine, Office of the Governor. **Residential Geothermal Heating & Cooling Systems in Maine.** Disponível em: <<http://www.maine.gov/energy/pdf/LD1222%20Geothermal%20FINAL%20April%202011.pdf>> Acesso em: out. de 2014.
- [27] Canada's Office of Energy Efficiency - Natural Resources. **Heating and Cooling With a Heat Pump.** Disponível em: <<https://oee.nrcan.gc.ca/sites/oee.nrcan.gc.ca/files/pdf/publications/infosource/pub/home/heating-heat-pump/booklet.pdf>> Acesso em: out. de 2014.
- [28] ASHRAE 2000 hvac systems and equipment handbook.

- [29] Jackson, R.D. et al. **Thermal Conductivity and Diffusivity - in Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods.** American Society of Agronomy, 1986.
- [30] Prevedello, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Salesward-Discovery, 1996.
- [31] Reichardt, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** ESALQ/USP, 1996.
- [32] Dutra, A. **Aproveitamento de Fontes Alternativas para Redução do Consumo de Energia Elétrica e Reflexos nos seus Custos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- [33] Creder, H. **Instalações de Ar condicionado.** Livros Técnicos e Científicos Editora, 5ª edição, 1996 reimpressão 1997.
- [34] Colabone, R. O. **Determinação da difusividade térmica de um solo incorporado com resíduo de E.T.A.** (Dissertação de Mestrado em Física), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- [35] Martins, D. C. et al., **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não-Isolados.** 2ª Edição. Ed. dos autores, Florianópolis, 2006.
- [36] Ortigoza, R. S. et al. **Two-Stage Control Design of a Buck Converter/DC Motor System without Velocity Measurements via a $\Sigma - \Delta$ -Modulator.** Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2013, Article ID 929316.
- [37] PROTOLAB, **Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação.** Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm>> Acesso em: out. de 2014.
- [38] EPE, Empresa de Pesquisa Energética **Resenha Mensal.** Disponível em: <http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20130730_1.pdf> Acesso em: out. de 2014.
- [39] TECHTUBO, indústria de dutos. Disponível em: <<http://www.techduto.com.br/corrugado>> Acesso em: out. de 2014.
- [40] ITAIPU BINACIONAL. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>> Acesso em: maio de 2015.
- [41] Pereira, P. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE 1ª Edição. São José dos Campos – 2006.
- [42] Xia, C. et al. **Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls.** Energy and Buildings, Vol. 52, pp.50–55, 2012.
- [43] Ministério do Meio Ambiente, **Energia Solar.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>> Acesso em: junho de 2015.

- [44] Pomilio, J.A. **Fontes chaveadas**. Publicação FEE 13/95 – 2004.
- [45] Rashid M. H. **POWER ELECTRONICS HANDBOOK DEVICES, CIRCUITS, AND APPLICATIONS** Third Edition - 2011.
- [46] Seguel J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, 2009
- [47] Nogushi T. et al. **Maximum Power Point Tracking Method of Photovoltaic System Using Only Single Current Sensor**. 10th European Conference on Power Electronics and Applications Toulouse/França, 2003.
- [48] Freitas F. G. et al. **Aplicação de Metaheurísticas em Problemas da Engenharia de Software: Revisão de Literatura**. II Congresso Tecnológico Infobrasil, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A – CIRCUITOS UTILIZADOS

A.1 Controle HCC

A foto da figura A.1 ilustra o conjunto de circuitos utilizados no controle HCC e aquisição de dados do condicionamento geotérmico, na parte superior estão localizadas três baterias e a placa de aquisição de dados, que é apresentada com mais detalhes no apêndice A. Também contém dois sensores de corrente no lado esquerdo, um duplo sensor de tensão localizado ao centro junto com o *display* LCD, e na parte inferior, dois indutores e o duplo conversor CC-CC *buck*, incluindo o microcontrolador PIC. Este conjunto faz o controle da bomba hidráulica e do ventilador.



Figura A.1 – Circuitos utilizados no controle HCC e placa de aquisição de dados

A.2 Código fonte do controle HCC

```

#define numSensors 2
#define Tref1 0x120 // Tref1 = 18°C
#define Tref2 0x180 // Tref2 = 24°C

unsigned int T[numSensors], Ta[numSensors];

typedef struct romCode{
    char codigo[5];
} RomCode;

RomCode romCodeT [numSensors] =
{
    {0xd5, 0x8b, 0xce, 0x4, 0x38}, // sensor 2 (saída de ar)
    {0x8, 0x69, 0xce, 0x4, 0xef}, // sensor 7 (sala)
};

//----- Write ROMCODE -----
//----- function sends 64 bits (8bytes) ROMCODE -----
//----- require 8 bytes array -----
void write_matchROM(char *pt){
    char i, j=0;
    for(i=0; i<=7; i++)
    {
        //Write_18B20 adress;
        if(i==0) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x28);
        //else if(i==3) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x97);
        //else if(i==4) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x3);
        else if(i==5 || i==6) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x0);
        else
        {
            Ow_Write(&PORTB, 7, pt[j]); j++;
        }
        //Ow_Write(&PORTB, 7, pt[i]);
    }
}

```

```

    }
}

void Read_Temp()
{
    //--- perform temperature reading
    unsigned i;
    for(i=0;i<numSensors; i++)
    {
        Ow_Reset(&PORTB, 7);           // Onewire reset signal
        Ow_Write(&PORTB, 7, 0x55);     // Issue command MATCH_ROM
        write_matchROM(romCodeT[i].codigo);
        Ow_Write(&PORTB, 7, 0x44);     // Issue command CONVERT_T
        Delay_us(120);

        Ow_Reset(&PORTB, 7);
        Ow_Write(&PORTB, 7, 0x55);     // Issue command MATCH_ROM
        write_matchROM(romCodeT[i].codigo);
        Ow_Write(&PORTB, 7, 0xBE);     // Issue command READ_SCRATCHPAD

        T[i] = Ow_Read(&PORTB, 7);
        T[i] = (Ow_Read(&PORTB, 7) << 8) + T[i];
        if(T[i] > 0x7d0)
            i--;

        else
            Delay_ms(300);
    }
}

#define flag 5
void main() {
    int j;

```

```

unsigned short duty[2], dutya[2];
TRISC = 0; // PORTC are outputs (PWM)
TRISA = 0xFF; // PORTA is input
ADCON1 = 0x80;
PWM1_Init(10000);          // Initialize PWM1 module at 10KHz
PWM2_Init(10000);          // Initialize PWM2 module at 10KHz
PWM1_Start();              // start PWM1
PWM2_Start();              // start PWM2
PWM1_Set_Duty(127);        // Set current duty for PWM1 (ventilador)
PWM2_Set_Duty(127);        // Set current duty for PWM2 (bomba)
Read_Temp();

for(j=0; j<numSensors; j++){
    Ta[j]=0;
}

for(;;){

    Read_Temp();
    if(T[1]<Tref1){ // winter
        for(j=0; j<2; j++){
            duty[j] = 127;
        }
        PWM1_Set_Duty(255-duty[0]); // Set current duty for PWM1 (ventilador)
        PWM2_Set_Duty(255-duty[1]); // Set current duty for PWM2 (bomba)
        delay_ms(5000);
        PWM1_Set_Duty(0); // Set current duty for PWM1
        do{
            if((T[0]>Ta[0] && duty[1]>dutya[1]) || (T[0]<=Ta[0] && duty[1]<dutya[1]) ||
duty[1]==0)
                duty[1]+=flag;

```

```

else if((T[0]>Ta[0] && duty[1]<dutya[1]) || (T[0]<=Ta[0] &&
duty[1]>dutya[1]) || duty[1]==255)
    duty[1]-=flag;
    PWM2_Set_Duty(255-duty[1]); // Set current duty for PWM2
    delay_ms(180000);
    dutya[1]=duty[1];
    Ta[0]=T[0];
    Read_Temp();
}while(T[1]<Tref1); // winter

}

if(T[1]>Tref2){ //summer
    for(j=0; j<2; j++){
        duty[j] = 127;

    }
    PWM1_Set_Duty(255-duty[0]); // Set current duty for PWM1
    PWM2_Set_Duty(255-duty[1]); // Set current duty for PWM2
    delay_ms(5000);
    PWM1_Set_Duty(0); // Set current duty for PWM1
    do{
        if((T[0]<Ta[0] && duty[1]>dutya[1]) || (T[0]>=Ta[0] && duty[1]<dutya[1]) ||
duty[1]==0)
            duty[1]+=flag;
        else if((T[0]<Ta[0] && duty[1]<dutya[1]) || (T[0]>=Ta[0] &&
duty[1]>dutya[1]) || duty[1]==255)
            duty[1]-=flag;
        PWM2_Set_Duty(255-duty[1]); // Set current duty for PWM2
        delay_ms(180000);
        dutya[1]=duty[1];
        Ta[0]=T[0];
        Read_Temp();
    }while(T[1]>Tref2); // summer
}

```

```
/*for(j=0; j<2; j++){  
    duty[j] = 0;  
} */  
PWM1_Set_Duty(255/*-duty[0]*); // Set current duty for PWM1  
PWM2_Set_Duty(255/*-duty[1]*); // Set current duty for PWM2  
delay_ms(60000);  
}  
}
```


A.3 Controle do ar condicionado com aquisição de dados

A foto da figura A.2 ilustra o conjunto de circuitos utilizados no controle do ar condicionado e aquisição de dados, na parte inferior estão localizadas a contatora e a placa de aquisição de dados e controle, junto com o *display* LCD. No centro contém um sensor de corrente, e na parte superior, o sensor de corrente junto com o transformador conversor de tensão.

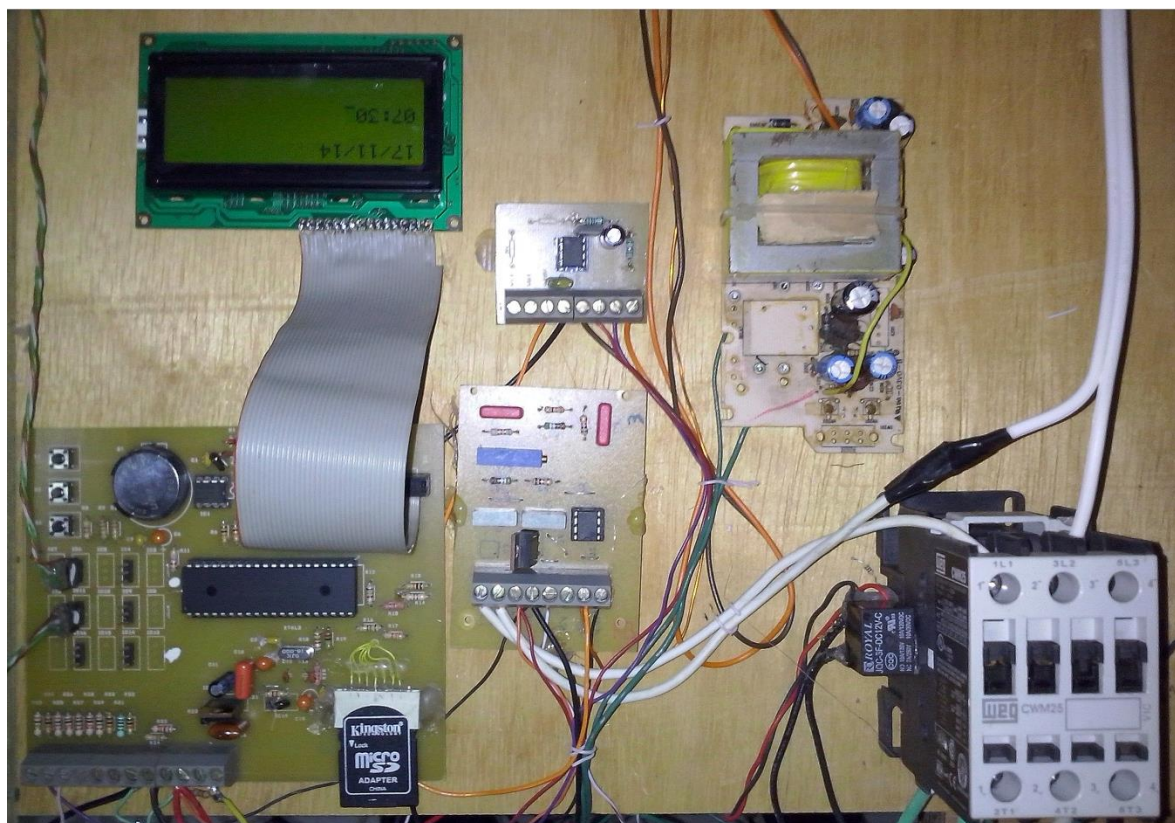


Figura A.2 – Circuitos utilizados no controle do ar condicionado

A.4 Código fonte do controle do ar condicionado

```
// Software I2C connections
sbit Soft_I2C_Scl      at RC6_bit;
sbit Soft_I2C_Sda      at RC7_bit;
sbit Soft_I2C_Scl_Direction at TRISC6_bit;
sbit Soft_I2C_Sda_Direction at TRISC7_bit;
// End Software I2C connections

// LCD module connections
```

```

sbit LCD_RS at LATD2_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_EN at LATD3_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D4 at LATD4_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D5 at LATD5_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D6 at LATD6_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D7 at LATD7_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)

```

```

sbit LCD_RS_Direction at TRISD2_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISD3_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISD4_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISD5_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISD6_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISD7_bit;
// End LCD module connections

```

```

// MMC module connections
sbit Mmc_Chip_Select      at LATC0_bit;
sbit Mmc_Chip_Select_Direction at TRISC0_bit;
// eof MMC module connections

```

```

#define numSensors 2
#define NumADs 2
#define Tref1 0x110 // Tref1 = 17°C
#define Tref2 0x180 // Tref2 = 24°C

```

```

char /*sign[numSensors],*/ filename[14] = "00-00-10.txt";

```

```

unsigned int dayant=0, clktime[6], minant=60;//seconds, minutes, hours, day, month, year;

```

```

// Global date/time variables

```

```

unsigned int ad[NumADs], sign[numSensors];

```

```

unsigned int T[numSensors], Tfrac[numSensors], Tread[numSensors];

```

```

typedef struct romCode{

```

```

char codigo[5];
} RomCode;

RomCode romCodeT [numSensors] =
{
  {0x32, 0x50, 0x68, 0x5, 0xb1}, //sala geotérmica
  {0xe, 0x3b, 0x67, 0x5, 0xda}, //sala ar condicionado
};

void Read_Time() {
  int i;
  Soft_I2C_Start(); // Issue start signal
  Soft_I2C_Write(0xA0); // Address PCF8583, see PCF8583 datasheet
  Soft_I2C_Write(2); // Start from address 2
  Soft_I2C_Start(); // Issue repeated start signal
  Soft_I2C_Write(0xA1); // Address PCF8583 for reading R/W=1
  for(i=5;i>1;i--)
  clktime[i] = Soft_I2C_Read(1); /* // Read seconds byte
  clktime[4] = Soft_I2C_Read(1); // Read minutes byte
  clktime[3] = Soft_I2C_Read(1); // Read hours byte
  clktime[2] = Soft_I2C_Read(1); // Read year/day byte */
  clktime[1] = Soft_I2C_Read(0); // Read weekday/month byte
  Soft_I2C_Stop(); // Issue stop signal
}

//----- Formats date and time
void Transform_Time() {
  clktime[0] = (clktime[2] & 0xC0) >> 6; // Transform year
  clktime[1] = ((clktime[1] & 0x10) >> 4)*10 + (clktime[1] & 0x0F); // Transform
month
  clktime[2] = ((clktime[2] & 0x30) >> 4)*10 + (clktime[2] & 0x0F); // Transform
day
  clktime[3] = ((clktime[3] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[3] & 0x0F); // Transform hours

```

```

clktime[4] = ((clktime[4] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[4] & 0x0F); // Transform minutes
//clktime[5] = ((clktime[5] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[5] & 0x0F); // Transform seconds
}

//----- Output values to LCD
void Display_Date()
{
    char str[9];
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    sprintf(str, "%.2d/%.2d/1%d", clktime[2], clktime[1], clktime[0]+4);
    Lcd_Out(1,1, str);

    sprintf(str, "%.2d:%.2d", clktime[3], clktime[4]);
    Lcd_Out(3,1, str);
    delay_ms(3000);
}

void AD_Displ()
{
    unsigned char lcd[] = "Nx: 00000"; //,ch1;//,ch2;
    int j;
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    for(j=0;j<NumADs;j++){

        if(j%2==0) sprintf(lcd, "V%d: %.5d", j/2+1, ad[j]);
        else sprintf(lcd, "I%d: %.5d", j/2+1, ad[j]);
        //
        // Display result on LCD
        //
        Lcd_Out(j+1,1,lcd); // Output to LCD
    }
    delay_ms(3000);
}

```

```

}

//----- Write ROMCODE -----
//----- fuction sends 64 bits (8bytes) ROMCODE -----
//----- require 8 bytes array -----
void write_matchROM(char *pt){
    char i, j=0;
    for(i=0; i<=7; i++)
    {
        //Write_18B20 adress;
        if(i==0) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x28);
        //else if(i==3) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x97);
        //else if(i==4) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x3);
        else if(i==5 || i==6) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x0);
        else
        {
            Ow_Write(&PORTB, 7, pt[j]); j++;
        }
        //Ow_Write(&PORTB, 7, pt[i]);
    }
}

void Read_Temp()
{
    //--- perform temperature reading
    unsigned i, j=0;

    for(i=0; i<numSensors; i++)
    {
        Ow_Reset(&PORTB, 7);           // Onewire reset signal
        Ow_Write(&PORTB, 7, 0x55);     // Issue command MATCH_ROM
        write_matchROM(romCodeT[i].codigo);
        Ow_Write(&PORTB, 7, 0x44);     // Issue command CONVERT_T
        Delay_us(120);
    }
}

```

```

Ow_Reset(&PORTB, 7);
Ow_Write(&PORTB, 7, 0x55);           // Issue command MATCH_ROM
write_matchROM(romCodeT[i].codigo);
Ow_Write(&PORTB, 7, 0xBE);          // Issue command READ_SCRATCHPAD

T[i] = Ow_Read(&PORTB, 7);
T[i] = (Ow_Read(&PORTB, 7) << 8) + T[i];
if (T[i] > 0x7d0 && j<5){
    i--;
    j++;
}
else{
    Delay_ms(300);
    j=0;
    if (T[i] > 0x7d0){
        T[i]=0xffff-T[i]+1;
        sign[i]=45;
    }
    else sign[i]=43;
}
}
if(minant != clktime[4]){
    if((T[1]<=Tref1)) {
        if (T[1]<=(T[0]-0x4)) portc.rc2=1; // set port C2 PWM1 pin
        else portc.rc2=0; // unset port C2 PWM1 pin
    }
    else if((T[1]>=Tref2)) {
        if (T[1]>=(T[0]+0x4)) portc.rc2=1; // set port C2 PWM1 pin
        else portc.rc2=0; // unset port C2 PWM1 pin
    }
    else portc.rc2=0; // unset port C2 PWM1 pin
}
}
}

```

```

void Display_Temperature(int i) {
    //const unsigned short RES_SHIFT = TEMP_RESOLUTION - 8;
    //unsigned int temp_whole; //, temp_frac;
    int j, k=4;
    char txt[] = "Tx: +000.00°C";
    if(numSensors<4) k = numSensors;
    //else k = 4;
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    for(j=i;j<i+k;j++){
        if(j>=numSensors) break;
        // extract temp fraction and convert it to unsigned int
        Tfrac[j] = T[j];// << (4-RES_SHIFT);
        Tfrac[j] &= 0x000F;
        Tfrac[j] *= 625/100;

        // extract temp_whole
        Tread[j]=T[j];
        T[j] = T[j] >> 4;//RES_SHIFT;

        sprintf(txt, "T%d: %c%.3u%.2u",j+1, sign[j], T[j], Tfrac[j]);

        Lcd_Out(j-i+1, 1, txt);
    }
    delay_ms(3000);
}

void Create_File()
{
    dayant = clktime[2];
    sprintf(filename, "%.2d-%.2d-1%d.txt", clktime[2], clktime[1], clktime[0]+4);
    // Initialise the SPI bus
    //Spi1_Init_Advanced(_SPI_MASTER_OSC_DIV4,_SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE,

```

```

//_SPI_CLK_IDLE_LOW, _SPI_LOW_2_HIGH);
Mmc_Fat_Assign(filename,0xA0);

}

#define FatWord 35
void Send_Data()
{
    char str[FatWord];
    //unsigned int i, ana[3];          %c          %c
    //for(i=0;i<3;i++) ana, sign[0][i] = (, sign[1][i]) ad[2*i];
    sprintf(str, "%.2d: %.2d\t%.5d\t%.5d\t%c%.3d, %.2d\t%c%.3d, %.2d\r\n",
        clktime[3], clktime[4], ad[0], ad[1],
        sign[0], T[0], Tfrac[0], sign[1], T[1], Tfrac[1]);
    Mmc_Fat_Append();
    Mmc_Fat_Write(str, FatWord);
    minant = clktime[4];
}

void Init_Main()
{
    //int x;
    // Configure A/D converter. AN0, AN1, AN2, AN3, AN4 is used in this project
    ADCON1 = 0x80;

    TRISD = 0; // PORTD pins are outputs LCD and LEDs
    //TRISA = 0xFF; // PORTA pins are input (A/D)0-3
    //TRISB = 0b00001100;

    trisc.rc2 = 0; // PORTC2 is output
    portc.rc2=0; // unset port C2 PWM1 pin

    Lcd_Init(); // LCD is connected to PORTD

```



```

Soft_I2C_Init(); // Initialize Soft I2C communication

// Initialise the SPI bus
Spi1_Init_Advanced(_SPI_MASTER_OSC_DIV64,_SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE,
_SPI_CLK_IDLE_LOW, _SPI_LOW_2_HIGH);

// Initialise the SD card bus
while(Mmc_Init());
//Mmc_Fat_QuickFormat("ftf");
Mmc_Fat_Init();
//if(!x) Lcd_Out(1, 1, "Ok");
//else if(x==1) Lcd_Out(1, 1, "falha");
//else Lcd_Out(1, 1, "fudeu");//;
//delay_ms(2000);

}

void Read_AD()
{
    int i,j;
    //long m[NumADs];
    for(i=0;i<NumADs;i++){
        ad[i]=0;
        for(j=0;j<10;j++) // Read AD 10n times
            ad[i] += Adc_Read(i); // and calculates
        ad[i] = ad[i]/10; // the media
        //if(ad[i]<0) ad[i]=0;
        if(i==0) ad[i] = ad[i]*53; // Transform to voltage in milivolts
        //else if(i==2) ad[i] = ad[i]*24; // Transform to voltage in milivolts
        //else if(i==1) ad[i] = (((ad[i]-42)/10)*646)/10); // Transform the first current sensor
value read to current in miliamperes
        else if(ad[i] > 42) ad[i] = (((ad[i]-42))*65)/10); // Transform the second current
sensor value read to current in miliamperes
        else ad[i]=0;
    }
}

```

```
    }  
}  
  
void main()  
{  
    int i;  
    Init_Main();  
  
    // Program loop  
    //  
    for(;;) // Endless loop  
    {  
        Read_Time();           // Read time from RTC(PCF8583)  
        Transform_Time();      // Format date and time  
        Display_Date();        // Prepare and display on LCD  
  
        Read_AD();             // Read A0, A1, A2 and A3 AD's  
        AD_Dispatch();         // Display read values from AD  
  
        Read_Temp();           // Read temperature values from 18b20 sensors  
        for(i=0;i<numSensors;i+=4) // Display temperatures  
            Display_Temperature(i);  
  
        // Create file on SD Card  
        if(clktime[2]!=dayant) Create_File(); // If new date create new file  
        // Write SD Card  
        if( /*clktime[4]%5==0 &&*/ clktime[4]!=minant) Send_Data();  
        //Send_Data(); // Send data to file  
    }  
}
```

APÊNDICE B - AQUISIÇÃO DE DADOS

Ao longo do dia, são feitas diversas medições como temperaturas, tensões e correntes. Como os experimentos são realizados durante vários meses, torna-se necessário o uso de aquisição de dados para guardar estas informações.

A aquisição de dados é composta pelos seguintes componentes: 1 microcontrolador PIC 18F4520, 1 *clock* PCF8583 para armazenar data e hora, 1 cartão de memória (*SD card*), 1 visor 4x20, 2 sensores de corrente, 2 sensores de tensão e 6 sensores digitais de temperatura DS18B20. Os sensores de temperatura são ligados em um único pino do PIC de modo que podem ser ligados vários sensores. Na placa de aquisição de dados foram feitas conexões para até 15 sensores de temperatura. A aquisição é feita de modo que os dados medidos são armazenados a cada 5 minutos em arquivos com formato txt, criados no cartão SD.

B.1 Diagrama esquemático

A aquisição de dados é feita conforme o diagrama apresentado na figura B.1.

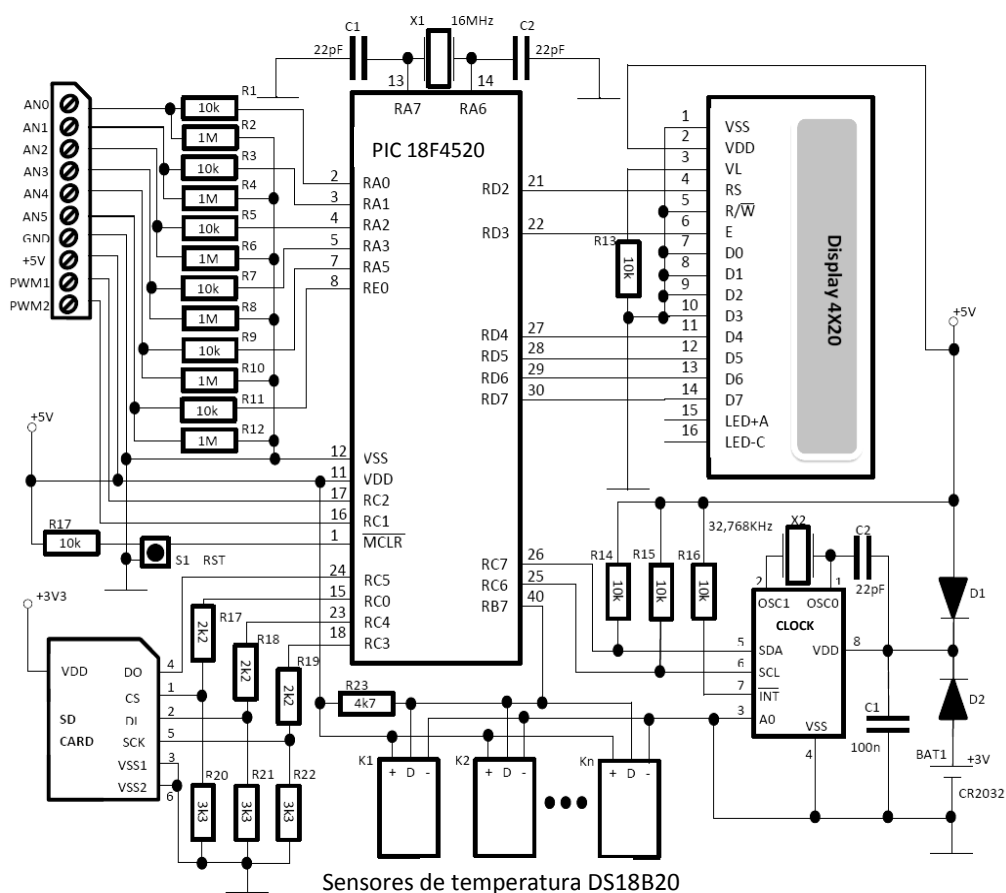


Figura B.1 – Diagrama esquemático da aquisição de dados

B.2 Código fonte da aquisição de dados

```
// Software I2C connections
sbit Soft_I2C_Scl      at RC6_bit;
sbit Soft_I2C_Sda      at RC7_bit;
sbit Soft_I2C_Scl_Direction at TRISC6_bit;
sbit Soft_I2C_Sda_Direction at TRISC7_bit;
// End Software I2C connections

// LCD module connections
sbit LCD_RS at LATD2_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_EN at LATD3_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D4 at LATD4_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D5 at LATD5_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D6 at LATD6_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D7 at LATD7_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)

sbit LCD_RS_Direction at TRISD2_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISD3_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISD4_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISD5_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISD6_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISD7_bit;
// End LCD module connections

// MMC module connections
sbit Mmc_Chip_Select      at LATC0_bit;
sbit Mmc_Chip_Select_Direction at TRISC0_bit;
// eof MMC module connections

#define numSensors 6
#define AreaPV 0.454
#define NumADs 4
```

```

char filename[14];

unsigned int dayant=0, clktime[6], minant=60;//seconds, minutes, hours, day, month, year;
// Global date/time variables
unsigned int ad[NumADs], sign[numSensors];
unsigned int T[numSensors], Tfrac[numSensors], Tread[numSensors];

typedef struct romCode{
    char codigo[5];
} RomCode;

RomCode romCodeT [numSensors] =
{
    {0xee, 0x78, 0xce, 0x4, 0xc5}, /*{0x32, 0x50, 0x68, 0x5, 0xb1},*/ //externa
    {0x58, 0xbf, 0xcd, 0x4, 0x8b}, //referência
    {0x4f, 0x36, 0x68, 0x5, 0xee}, //sala
    {0xac, 0x8b, 0xce, 0x4, 0x36}, //saída de ar
    {0xe3, 0x84, 0x97, 0x3, 0x39}, //saída de água
    {0x79, 0x5a, 0x75, 0x4, 0x8f} //entrada de água
};

void Read_Time() {
    int i;
    Soft_I2C_Start(); // Issue start signal
    Soft_I2C_Write(0xA0); // Address PCF8583, see PCF8583 datasheet
    Soft_I2C_Write(2); // Start from address 2
    Soft_I2C_Start(); // Issue repeated start signal
    Soft_I2C_Write(0xA1); // Address PCF8583 for reading R/W=1
    for(i=5;i>1;i--)
        clktime[i] = Soft_I2C_Read(1); /* // Read seconds byte
        clktime[4] = Soft_I2C_Read(1); // Read minutes byte
        clktime[3] = Soft_I2C_Read(1); // Read hours byte
        clktime[2] = Soft_I2C_Read(1); // Read year/day byte */
        clktime[1] = Soft_I2C_Read(0); // Read weekday/month byte

```

```

Soft_I2C_Stop();          // Issue stop signal

}

//----- Formats date and time
void Transform_Time() {
    clktime[0]  = (clktime[2] & 0xC0) >> 6;          // Transform year
    clktime[1]  = ((clktime[1] & 0x10) >> 4)*10 + (clktime[1] & 0x0F);    // Transform
month
    clktime[2]  = ((clktime[2] & 0x30) >> 4)*10  + (clktime[2] & 0x0F);    // Transform
day
    clktime[3]  = ((clktime[3] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[3] & 0x0F);    // Transform hours
    clktime[4]  = ((clktime[4] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[4] & 0x0F);    // Transform minutes
    //clktime[5] = ((clktime[5] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[5] & 0x0F);    // Transform seconds
}

//----- Output values to LCD
void Display_Date()
{
    char str[9];
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    sprintf(str, "%.2d/%.2d/1%d", clktime[2], clktime[1], clktime[0]+4);
    Lcd_Out(1,1, str);

    sprintf(str, "%.2d:%.2d", clktime[3], clktime[4]);
    Lcd_Out(2,1, str);
    delay_ms(3000);
}

void AD_Displ()
{
    unsigned char lcd[] = "Nx: 00000";//,ch1;//,ch2;
    int j;
    //Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);

```

```

for(j=0;j<NumADs;j++){

    if(j%2==0) sprintf(lcd, "V%d: %.5d", j/2+1, ad[j]);
    else sprintf(lcd, "I%d: %.5d", j/2+1, ad[j]);
    //
    // Display result on LCD
    //
    Lcd_Out(j+1,1,lcd); // Output to LCD
    }
    delay_ms(3000);
}

//----- Write ROMCODE -----
//----- fuction sends 64 bits (8bytes) ROMCODE -----
//----- require 8 bytes array -----
void write_matchROM(char *pt){
    char i, j=0;
    for(i=0; i<=7; i++)
    {
        //Write_18B20 adress;
        if(i==0) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x28);
        //else if(i==3) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x97);
        //else if(i==4) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x3);
        else if(i==5 || i==6) Ow_Write(&PORTB, 7, 0x0);
        else
        {
            Ow_Write(&PORTB, 7, pt[j]); j++;
        }
        //Ow_Write(&PORTB, 7, pt[i]);
    }
}

void Read_Temp()
{

```

```

//--- perform temperature reading
unsigned i,j=0;

for(i=0;i<numSensors; i++)
{
    Ow_Reset(&PORTB, 7);           // Onewire reset signal
    Ow_Write(&PORTB, 7, 0x55);     // Issue command MATCH_ROM
    write_matchROM(romCodeT[i].codigo);
    Ow_Write(&PORTB, 7, 0x44);     // Issue command CONVERT_T
    Delay_us(120);

    Ow_Reset(&PORTB, 7);
    Ow_Write(&PORTB, 7, 0x55);     // Issue command MATCH_ROM
    write_matchROM(romCodeT[i].codigo);
    Ow_Write(&PORTB, 7, 0xBE);     // Issue command READ_SCRATCHPAD

    T[i] = Ow_Read(&PORTB, 7);
    T[i] = (Ow_Read(&PORTB, 7) << 8) + T[i];
    if (T[i] > 0x7d0 && j<5){
        i--;
        j++;
    }
    else{
        Delay_ms(300);
        j=0;
        if (T[i] > 0x7d0){
            T[i]=0xffff-T[i]+1;
            sign[i]=45;
        }
        else sign[i]=43;
        //Delay_ms(100);
    }
}
}

```



```
}

```

```
void Display_Temperature(int i) {
    //const unsigned short RES_SHIFT = TEMP_RESOLUTION - 8;
    //unsigned int temp_whole; //, temp_frac;
    int j, k=4;
    char txt[] = "Tx: +000.00°C";
    if(numSensors<4) k = numSensors;
    //else k = 4;
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    for(j=i;j<i+k;j++){
        if(j>=numSensors) break;
        // extract temp fraction and convert it to unsigned int
        Tfrac[j] = T[j];// << (4-RES_SHIFT);
        Tfrac[j] &= 0x000F;
        Tfrac[j] *= 625/100;

        // extract temp_whole
        Tread[j]=T[j];
        T[j] = T[j] >> 4;//RES_SHIFT;

        sprintf(txt, "T%d: %c%.3u%.2u",j+1, sign[j], T[j], Tfrac[j]);

        Lcd_Out(j-i+1, 1, txt);
    }
    delay_ms(3000);
}

void Create_File()
{
    dayant = clktime[2];
    sprintf(filename, "%.2d-%.2d-1%d.txt", clktime[2], clktime[1], clktime[0]+4);
    // Initialise the SPI bus
    //Spi1_Init_Advanced(_SPI_MASTER_OSC_DIV4,_SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE,
```

```

//_SPI_CLK_IDLE_LOW, _SPI_LOW_2_HIGH);
Mmc_Fat_Assign(filename,0xA0);

}

#define FatWord 79
void Send_Data()
{
    char str[FatWord];
    //unsigned int i, ana[3];
    //for(i=0;i<3;i++) ana[i] = (int) ad[2*i];
    sprintf(str,
"% .2d:%.2d\t%.5d\t%.5d\t%.5d\t%.5d\t%c%.3d,%.2d\t%c%.3d,%.2d\t%c%.3d,%.2d\t%c%.3
d,%.2d\t%c%.3d,%.2d\t%c%.3d,%.2d\r\n",
    clktime[3], clktime[4], ad[0], ad[1], ad[2], ad[3],
    sign[0], T[0], Tfrac[0], sign[1], T[1], Tfrac[1], sign[2], T[2], Tfrac[2],
    sign[3], T[3], Tfrac[3], sign[4], T[4], Tfrac[4], sign[5], T[5], Tfrac[5]);
    Mmc_Fat_Append();
    Mmc_Fat_Write(str, FatWord);
    minant = clktime[4];
}

void Init_Main()
{
    //int x;
    // Configure A/D converter. AN0, AN1, AN2, AN3, AN4 is used in this project
    ADCON1 = 0x80;

    TRISD = 0; // PORTD pins are outputs LCD and LEDs
    //TRISA = 0xFF; // PORTA pins are input (A/D)0-3
    //TRISB = 0b00001100;

    Lcd_Init(); // LCD is connected to PORTD

```

```

Soft_I2C_Init(); // Initialize Soft I2C communication

// Initialise the SPI bus
Spi1_Init_Advanced(_SPI_MASTER_OSC_DIV64,_SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE,
_SPI_CLK_IDLE_LOW, _SPI_LOW_2_HIGH);

// Initialise the SD card bus
while(Mmc_Init());
//Mmc_Fat_QuickFormat("ftf");
Mmc_Fat_Init();
//if(!x) Lcd_Out(1, 1, "Ok");
//else if(x==1) Lcd_Out(1, 1, "falha");
//else Lcd_Out(1, 1, "fudeu");//;
//delay_ms(2000);

}

void Read_AD()
{
    int i,j;
    //long m[NumADs];
    for(i=0;i<NumADs;i++){
        ad[i]=0;
        for(j=0;j<10;j++) // Read AD 10n times
            ad[i] += Adc_Read(i); // and calculates
        ad[i] = ad[i]/10; // the media
        //if(ad[i]<0) ad[i]=0;
        if(i==0) ad[i] = ad[i]*25; // Transform to voltage in milivolts
        else if(i==2) ad[i] = ad[i]*24; // Transform to voltage in milivolts
        //else if(i==1) ad[i] = (((ad[i]-42)/10)*646)/10); // Transform the first current sensor
value read to current in miliamperes
        else if(ad[i] > 42) ad[i] = (((ad[i]-42))*65)/10); // Transform the second current
sensor value read to current in miliamperes
        else ad[i]=0;
    }
}

```

```

    }
}

void main()
{
    int i;
    Init_Main();

    // Program loop
    //
    for(;;) // Endless loop
    {
        Read_Time();          // Read time from RTC(PCF8583)
        Transform_Time();     // Format date and time
        Display_Date();       // Prepare and display on LCD

        Read_AD();           // Read A0, A1, A2 and A3 AD's
        AD_Disp();           // Display read values from AD

        Read_Temp();         // Read temperature values from 18b20 sensors
        for(i=0;i<numSensors;i+=4) // Display temperatures
            Display_Temperature(i);

        // Create file on SD Card
        if(clktime[2]!=dayant) Create_File(); // If new date create new file
        // Write SD Card
        if(/*clktime[4]%5==0 &&*/ clktime[4]!=minant) Send_Data();
        //Send_Data(); // Send data to file
    }
}

```

APÊNDICE C - SENSORES DE CORRENTE

C.1 Circuito eletrônico de condicionamento de sinais

A figura C.1 apresenta o circuito elétrico utilizado para calibrar a tensão de saída do sensor de corrente modelo ACS712TELC-05B. A tensão de saída do sensor varia linearmente com a corrente de entrada de 1,5 a 3,5 V para correntes de -5 a 5 A respectivamente. Os valores de cada componente deste circuito estão descritos na tabela C.1.

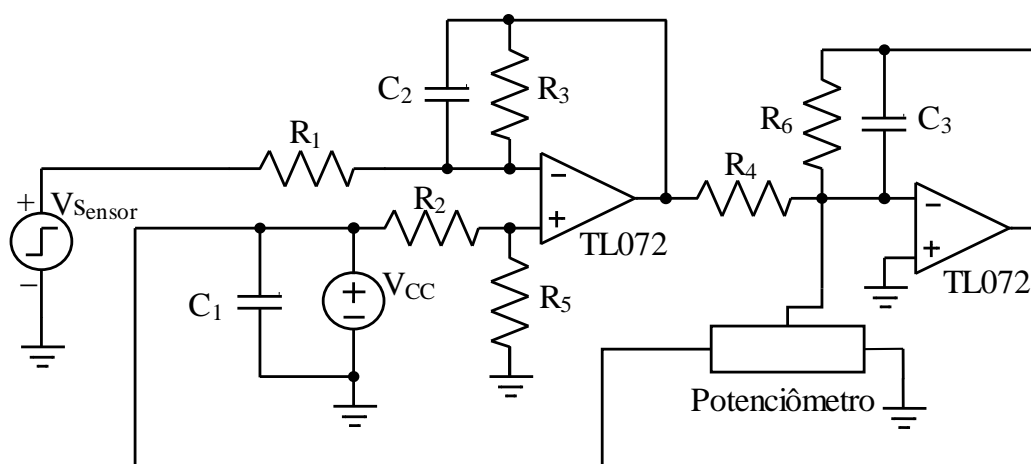


Figura C.1 – Circuito elétrico para calibrar a tensão de saída do sensor de corrente

Tabela C.1 – Valores dos componentes utilizados

Componente	Valor
R ₁ (kΩ)	5
R ₂ (kΩ)	10
R ₃ (kΩ)	10
R ₄ (kΩ)	3,3
R ₅ (kΩ)	5
R ₆ (kΩ)	6,8
C ₁ (nF)	10
C ₂ (nF)	10
C ₃ (nF)	10
Potenciômetro (kΩ)	20
V _{CC} (V)	5
V _{Sensor} (V)	1,5 a 3,5

C.2 Calibração dos sensores

A calibração dos sensores de corrente utilizados foram feitas com base nos resultados das medições de corrente de entrada e tensão de saída apresentados na tabela D.2 de modo a garantir que a tensão de saída fique na faixa de 0 a 5 V.

Tabela C.2 – Medição das tensões de saída do circuito em função da corrente de entrada

I(A)	V₁(V)	V₂(V)
0,0	0,21	0,21
0,5	0,59	0,58
1,0	0,96	0,95
1,5	1,34	1,32
2,0	1,73	1,69
3,0	2,48	2,44
4,0	3,24	3,18
5,0	4,0	3,92
6,0	4,74	4,65

APÊNDICE D - SENSORES DE TENSÃO

D.1 Circuito eletrônico dos sensores de tensão do condicionador geotérmico

A figura D.1 apresenta o circuito elétrico utilizado para o sensor de tensão da alimentação do condicionador geotérmico, o sensor foi utilizado para capturar a tensão de alimentação da bomba hidráulica e do ventilador. A tensão de saída do sensor é proporcional a 0,2034 do valor de entrada. Os valores de cada componente deste circuito estão descritos na tabela D.1.

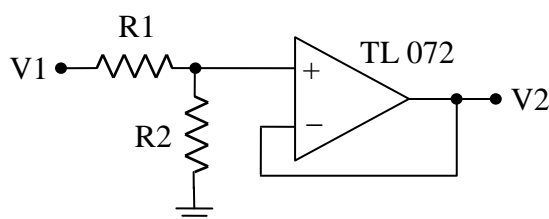


Figura D.1 – Circuito elétrico do sensor de tensão de alimentação do condicionador geotérmico

Tabela D.1 – Valores dos componentes utilizados no sensor de tensão

Componente	Valor
R ₁ (k Ω)	47
R ₂ (k Ω)	12

D.2 Circuito eletrônico do sensor de tensão do ar condicionado

A figura D.2 apresenta o circuito elétrico utilizado para o sensor de tensão da alimentação do ar condicionado. A tensão de saída do sensor varia linearmente com a corrente de entrada de 1,76 a 2,14 V para tensões de entrada de 190 a 230 V, respectivamente. Os valores de cada componente deste circuito estão descritos na tabela D.2.

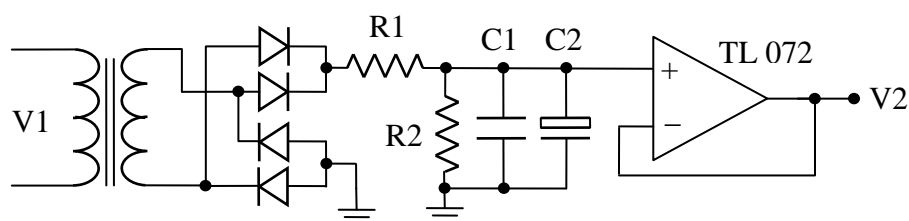


Figura D.2 – Circuito elétrico do sensor de tensão de alimentação do ar condicionado

Tabela D.2 – Valores dos componentes utilizados no sensor de tensão do ar condicionado

Componente	Valor
R ₁ (k Ω)	5
R ₂ (k Ω)	1
C ₁ (nF)	100
C ₂ (uF)	1

D.3 Calibração do sensor de tensão do ar condicionado

A calibração do sensor de tensão utilizado foi feita com base nos resultados das medições de tensão de entrada e tensão de saída apresentados na tabela D.3 de modo a garantir que a tensão de saída fique na faixa de 0 a 5 V.

Tabela D.3 – Medição das tensões de saída do circuito em função da tensão de entrada

V₁(V)	V₂(V)
230	2,14
225	2,10
220	2,05
215	2,00
210	1,95
205	1,91
200	1,86
195	1,81
190	1,76

APÊNDICE E – LEVANTAMENTO DA CARGA TÉRMICA

E.1 Carga térmica da sala de teste para calefação

Air System Sizing Summary for Sala de teste	
Project Name: Climatizador geotérmico	09/22/2014
Prepared by: home	05:00

Air System Information

Air System Name	Sala de teste	Number of zones	1
Equipment Class		Floor Area	9,3 m²
Air System Type		Location	Santa Maria, Brazil

Sizing Calculation Information

Zone and Space Sizing Method:

Zone L/s ..	Sum of space airflow rates	Calculation Months	Jan to Dec
Space L/s	Individual peak space loads	Sizing Data	Calculated

Central Heating Coil Sizing Data

Max coil load	0,3 kW	Load occurs at	Des Htg
Coil L/s at Des Htg	16 L/s	W/m ²	31,9
Max coil L/s	16 L/s	Ent. DB / Lvg DB	16,3 / 31,6 °C
Water flow @ 11,1 °K drop	N/A		

Supply Fan Sizing Data

Actual max L/s at Des Htg	16 L/s	Fan motor BHP	0,00 BHP
Standard L/s	16 L/s	Fan motor kW	0,00 kW
Actual max L/(s-m ²)	1,75 L/(s-m²)	Fan static	0 Pa

E.2 Carga térmica da sala de teste para arrefecimento

Air System Sizing Summary for Sala de teste	
Project Name: Climatizador geotérmico	09/22/2014
Prepared by: home	05:06

Air System Information

Air System Name	Sala de teste	Number of zones	1
Equipment Class		Floor Area	9,3 m²
Air System Type		Location	Santa Maria, Brazil

Sizing Calculation Information

Zone and Space Sizing Method:

Zone L/s ..	Sum of space airflow rates	Calculation Months	Jan to Dec
Space L/s	Individual peak space loads	Sizing Data	Calculated

Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load	0,8 kW	Load occurs at	Jan 0800
Sensible coil load	0,8 kW	OA DB / WB	27,0 / 22,3 °C
Coil L/s at Jan 0800	64 L/s	Entering DB / WB	24,4 / 7,9 °C
Max block L/s	64 L/s	Leaving DB / WB	14,4 / 2,8 °C
Sum of peak zone L/s	64 L/s	Coil ADP	13,3 °C
Sensible heat ratio	1,000	Bypass Factor	0,100
m ² /kW	12,3	Resulting RH	0 %
W/m ²	81,3	Design supply temp.	14,4 °C
Water flow @ 5,6 °K rise	N/A	Zone T-stat Check	0 of 1 OK
		Max zone temperature deviation	0,6 °K

Supply Fan Sizing Data

Actual max L/s	64 L/s	Fan motor BHP	0,00 BHP
Standard L/s	63 L/s	Fan motor kW	0,00 kW
Actual max L/(s-m ²)	6,85 L/(s-m²)	Fan static	0 Pa

E.3 Carga térmica da sala de referência para calefação

Air System Sizing Summary for Sala de referência	
Project Name: Climatizador geotérmico	09/22/2014
Prepared by: home	05:09

Air System Information

Air System Name .. Sala de referência	Number of zones 1
Equipment Class	Floor Area 9,3 m ²
Air System Type	Location Santa Maria, Brazil

Sizing Calculation Information

Zone and Space Sizing Method:

Zone L/s .. Sum of space airflow rates	Calculation Months Jan to Dec
Space L/s Individual peak space loads	Sizing Data Calculated

Central Heating Coil Sizing Data

Max coil load 0,3 kW	Load occurs at Des Htg
Coil L/s at Des Htg 19 L/s	W/m ² 35,3
Max coil L/s 19 L/s	Ent. DB / Lvg DB 17,3 / 32,1 °C
Water flow @ 11,1 °K drop N/A	

Supply Fan Sizing Data

Actual max L/s at Des Htg 19 L/s	Fan motor BHP 0,00 BHP
Standard L/s 18 L/s	Fan motor kW 0,00 kW
Actual max L/(s-m ²) 2,00 L/(s-m ²)	Fan static 0 Pa

E.4 Carga térmica da sala de referência para arrefecimento

Air System Sizing Summary for Sala de referência	
Project Name: condicionador geotérmico	09/22/2014
Prepared by: home	05:10

Air System Information

Air System Name .. Sala de referência	Number of zones	1
Equipment Class	Floor Area	9,3 m²
Air System Type	Location	Santa Maria, Brazil

Sizing Calculation Information

Zone and Space Sizing Method:

Zone L/s .. Sum of space airflow rates	Calculation Months	Jan to Dec
Space L/s Individual peak space loads	Sizing Data	Calculated

Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load	0,7 kW	Load occurs at	Jan 0800
Sensible coil load	0,7 kW	OA DB / WB	27,0 / 22,3 °C
Coil L/s at Jan 0800	60 L/s	Entering DB / WB	24,4 / 7,9 °C
Max block L/s	60 L/s	Leaving DB / WB	14,4 / 2,8 °C
Sum of peak zone L/s	60 L/s	Coil ADP	13,3 °C
Sensible heat ratio	1,000	Bypass Factor	0,100
m ² /kW	13,1	Resulting RH	0 %
W/m ²	76,1	Design supply temp.	14,4 °C
Water flow @ 5,6 °K rise	N/A	Zone T-stat Check	0 of 1 OK
		Max zone temperature deviation	0,5 °K

Supply Fan Sizing Data

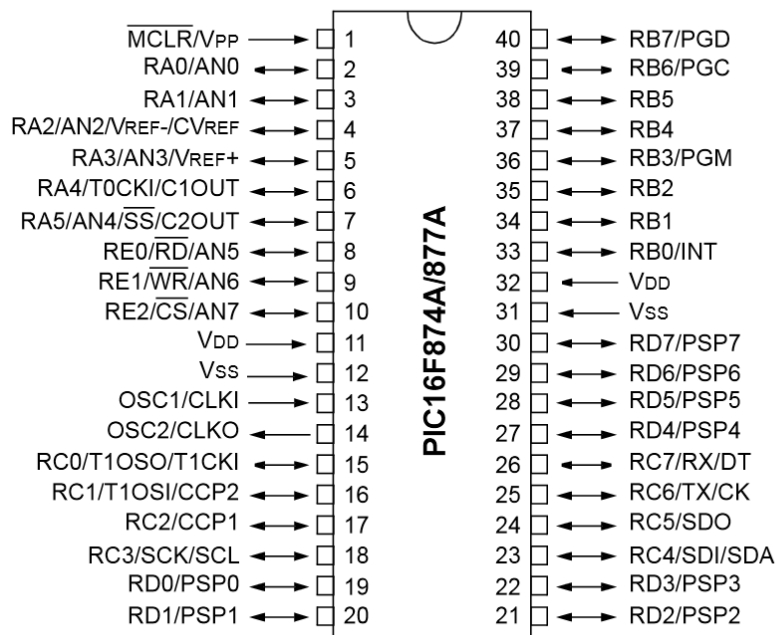
Actual max L/s	60 L/s	Fan motor BHP	0,00 BHP
Standard L/s	59 L/s	Fan motor kW	0,00 kW
Actual max L/(s-m ²)	6,42 L/(s-m²)	Fan static	0 Pa

ANEXOS

Nos seguintes anexos são apresentadas as principais especificações retiradas dos *datasheets* dos componentes utilizados durante este estudo.

ANEXO I - MICROCONTROLADOR PIC16F877A

40-Pin PDIP



PIC16F87XA DEVICE FEATURES

Key Features	PIC16F873A	PIC16F874A	PIC16F876A	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	256	256
Interrupts	14	15	14	15
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Analog Comparators	2	2	2	2
Instruction Set	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN

ANEXO II - MICROCONTROLADOR PIC18F4520

40-pin PDIP

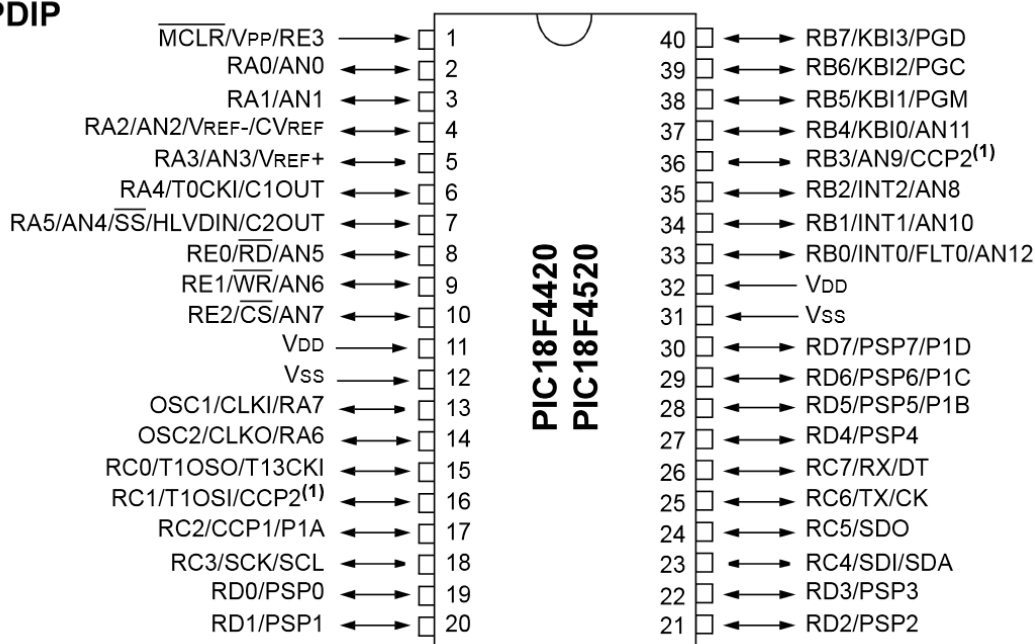


TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F2420	PIC18F2520	PIC18F4420	PIC18F4520
Operating Frequency	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz
Program Memory (Bytes)	16384	32768	16384	32768
Program Memory (Instructions)	8192	16384	8192	16384
Data Memory (Bytes)	768	1536	768	1536
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Parallel Communications (PSP)	No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable High/Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin QFN	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

ANEXO III - SENSOR DE TEMPERATURA

DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

DESCRIPTION

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. It has an operating temperature range of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ and is accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ over the range of -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

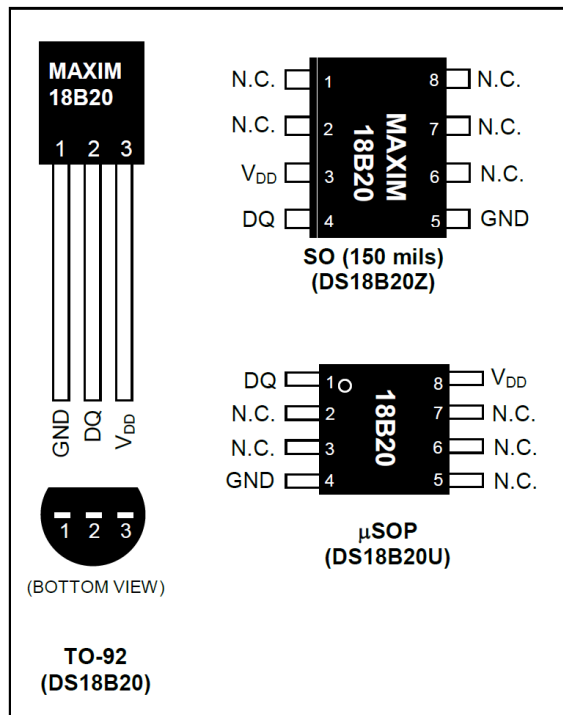
Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

FEATURES

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Each Device has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in an On-Board ROM
- Multidrop Capability Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications
- Requires No External Components
- Can Be Powered from Data Line; Power Supply Range is 3.0V to 5.5V
- Measures Temperatures from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ (-67°F to $+257^{\circ}\text{F}$)
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accuracy from -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Thermometer Resolution is User Selectable from 9 to 12 Bits
- Converts Temperature to 12-Bit Digital Word in 750ms (Max)

- User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings
- Alarm Search Command Identifies and Addresses Devices Whose Temperature is Outside Programmed Limits (Temperature Alarm Condition)
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP , and 3-Pin TO-92 Packages
- Software Compatible with the DS1822
- Applications Include Thermostatic Controls, Industrial Systems, Consumer Products, Thermometers, or Any Thermally Sensitive System

PIN CONFIGURATIONS



ANEXO IV - BOMBA HIDRÁULICA

FLOJET

LF-12 Series Automatic Water System Pump & Manual Demand Pump

FEATURES

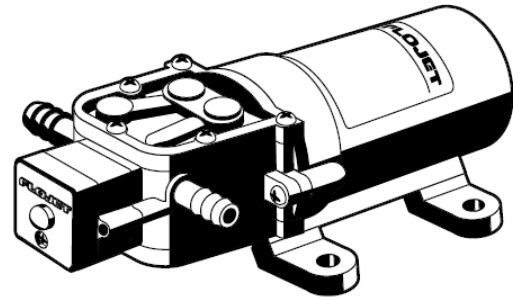
- Self-Priming
- Dry Running
- Automatic Operation (-202)
- Manual Demand (-002)
- Meets U.S.C.G. Electrical Requirements
- CSA listed
- IAPMO listed

SPECIFICATIONS

Motor: Permanent Magnet, Thermally Protected, Intermittant Duty

Pump: Two chamber opposed double diaphragm design; Self-priming up to 4 ft. suction lift; Pump able to run dry without damage. Intermittant duty.

Port: Pump housing inlet and outlet are 3/8" hose barb.



Model LF-12 Series



Pump Series	Dimensions - Inches (mm)			Weight lb. (kg)
	Height	Width	Length	
LF 122-202	2.28 (58)	3.5 (89)	6.37 (162)	1.3 (0.60)
LF 122-002	2.28 (58)	3.5 (89)	5.37 (136)	1.2 (0.55)

MODEL*	VOLTS	AMP DRAW @ 10 psi (0.7 bar)	FUSE** REQ'RD	FLOW GPM (l/min)	PRESSURE SWITCH PSI (BAR)	
					ON	OFF
LF 122-202	12V dc	1.9	4A	1.4 (4.3)	22 (1.5)	35 (2.4)
LF 122-002	12V dc	1.9	4A	1.4 (4.3)	No Pressure Switch	

*CE fully suppressed models are identified by a prefix "R" and a CE mark on the label. (i.e. RLF122-202)
Self Declaration Of Conformance (SDOC) is available upon request.

**4A fuse must be installed to meet CSA requirements.

OPERATION FOR WATER SYSTEM PUMPS

The FLOJET LF-12 series pumps are available as automatic and manual demand pumps. The LF122-202 will automatically turn on when a fixture is opened and turn off when all fixtures are closed. The LF122-002 is a manual demand pump for use with an electric faucet.

When starting up an automatic demand pump with a completely dry system allow time for the demand pump to fill the system. Open a faucet, allow air to vent and close faucet when water flow is steady. Faucet strainers and aerators should be cleaned regularly.

ANEXO V - VENTILADOR

BRUSHLESS CENTRIFUGAL BLOWER RANGE

12V - 24 V d.c.



TYPE 019-BBL301-95



TYPE 020-BBL303-95

- PWM and analog input for continuous adjustment of fan speed
- EMC directives: 2006/28/EC
- RoHS compliant: totally lead-free electronic assembly process
- Nominal power 300W and 500W
- Operating temperature range: -40 ÷ +120 °C
- Protection:
 - Overtemperature
 - Overcurrent
 - Mechanical overload
 - Locked rotor
 - Load dump
 - Overvoltage
 - Undervoltage

IP68 & IP6K9K PROTECTION
 VERY LONG LIFE (OVER 30.000 hrs)
 HIGH EFFICIENCY
 FAN DIAMETERS FROM 280 mm TO 405 mm
 AIRFLOWS UP TO 5.000 m³/h

ANEXO VI – AR CONDICIONADO



Ar Condicionado Janela 7.500 BTUs Frio – Mecânico (CCI07)

CLASSE A EM CONSUMO DE ENERGIA – Mais economia para o seu bolso.

PAINEL DISPENSA MOLDURA E ACABAMENTOS - Instalação prática e econômica.

EXCLUSIVO FILTRO PROTEÇÃO ATIVA - Que inibe a proliferação de ácaros, fungos e bactérias.

Compartilhar este produto

Curtir 5 Tweet

Características Técnicas

Classificação energética	A
Selo Procel	sim
Garantia	1 ano
Tensão (V)	127V-220V
Frequência (Hz)	60
Vazão de ar (m3/h)	330
Corrente (A)	7,6
Compressor	Rotativo
Saída de Ar	1 saída superior

Capacidade

Capacidade de refrigeração (BTU/h)	7500
Capacidade de aquecimento (BTU/h)	----
Temperatura	18 a 30°C
Proteção contra corrosão	sim

ANEXO VII – TABELA DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA SATURADA

Temp. T_s , °F	Pressão de saturação P_{sat} , psia	Densidade ρ , lbm/pé ³		Entalpia de vaporização h_{fg} , Btu/lbm	Calor específico c_p , Btu/lbm · R		Condutividade térmica k , Btu/h · pé · R		Viscosidade dinâmica μ , lbm/pé · s		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de expansão volumétrica β , 1/R
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
32,02	0,0887	62,41	0,00030	1075	1,010	0,446	0,324	0,0099	$1,204 \times 10^{-3}$	$6,194 \times 10^{-6}$	13,5	1,00	$-0,038 \times 10^{-3}$
40	0,1217	62,42	0,00034	1071	1,004	0,447	0,329	0,0100	$1,308 \times 10^{-3}$	$6,278 \times 10^{-6}$	11,4	1,01	$0,003 \times 10^{-3}$
50	0,1780	62,41	0,00059	1065	1,000	0,448	0,335	0,0102	$8,781 \times 10^{-4}$	$6,361 \times 10^{-6}$	9,44	1,01	$0,047 \times 10^{-3}$
60	0,2563	62,36	0,00083	1060	0,999	0,449	0,341	0,0104	$7,536 \times 10^{-4}$	$6,444 \times 10^{-6}$	7,95	1,00	$0,080 \times 10^{-3}$
70	0,3632	62,30	0,00115	1054	0,999	0,450	0,347	0,0106	$6,556 \times 10^{-4}$	$6,556 \times 10^{-6}$	6,79	1,00	$0,115 \times 10^{-3}$
80	0,5073	62,22	0,00158	1048	0,999	0,451	0,352	0,0108	$5,764 \times 10^{-4}$	$6,667 \times 10^{-6}$	5,89	1,00	$0,145 \times 10^{-3}$
90	0,6988	62,12	0,00214	1043	0,999	0,453	0,358	0,0110	$5,117 \times 10^{-4}$	$6,778 \times 10^{-6}$	5,14	1,00	$0,174 \times 10^{-3}$
100	0,9503	62,00	0,00286	1037	0,999	0,454	0,363	0,0112	$4,578 \times 10^{-4}$	$6,889 \times 10^{-6}$	4,54	1,01	$0,200 \times 10^{-3}$
110	1,2763	61,86	0,00377	1031	0,999	0,456	0,367	0,0115	$4,128 \times 10^{-4}$	$7,000 \times 10^{-6}$	4,05	1,00	$0,224 \times 10^{-3}$
120	1,6945	61,71	0,00493	1026	0,999	0,458	0,371	0,0117	$3,744 \times 10^{-4}$	$7,111 \times 10^{-6}$	3,63	1,00	$0,246 \times 10^{-3}$
130	2,225	61,55	0,00636	1020	0,999	0,460	0,375	0,0120	$3,417 \times 10^{-4}$	$7,222 \times 10^{-6}$	3,28	1,00	$0,267 \times 10^{-3}$
140	2,892	61,38	0,00814	1014	0,999	0,463	0,378	0,0122	$3,136 \times 10^{-4}$	$7,333 \times 10^{-6}$	2,98	1,00	$0,287 \times 10^{-3}$
150	3,722	61,19	0,0103	1008	1,000	0,465	0,381	0,0125	$2,889 \times 10^{-4}$	$7,472 \times 10^{-6}$	2,73	1,00	$0,306 \times 10^{-3}$
160	4,745	60,99	0,0129	1002	1,000	0,468	0,384	0,0128	$2,675 \times 10^{-4}$	$7,583 \times 10^{-6}$	2,51	1,00	$0,325 \times 10^{-3}$
170	5,996	60,79	0,0161	996	1,001	0,472	0,386	0,0131	$2,483 \times 10^{-4}$	$7,722 \times 10^{-6}$	2,90	1,00	$0,346 \times 10^{-3}$
180	7,515	60,57	0,0199	990	1,002	0,475	0,388	0,0134	$2,317 \times 10^{-4}$	$7,833 \times 10^{-6}$	2,15	1,00	$0,367 \times 10^{-3}$
190	9,343	60,35	0,0244	984	1,004	0,479	0,390	0,0137	$2,169 \times 10^{-4}$	$7,972 \times 10^{-6}$	2,01	1,00	$0,382 \times 10^{-3}$
200	11,53	60,12	0,0297	978	1,005	0,483	0,391	0,0141	$2,036 \times 10^{-4}$	$8,083 \times 10^{-6}$	1,88	1,00	$0,395 \times 10^{-3}$
210	14,125	59,87	0,0359	972	1,007	0,487	0,392	0,0144	$1,917 \times 10^{-4}$	$8,222 \times 10^{-6}$	1,77	1,00	$0,412 \times 10^{-3}$
212	14,698	59,82	0,0373	970	1,007	0,488	0,392	0,0145	$1,894 \times 10^{-4}$	$8,250 \times 10^{-6}$	1,75	1,00	$0,417 \times 10^{-3}$
220	17,19	59,62	0,0432	965	1,009	0,492	0,393	0,0148	$1,808 \times 10^{-4}$	$8,333 \times 10^{-6}$	1,67	1,00	$0,429 \times 10^{-3}$
230	20,78	59,36	0,0516	959	1,011	0,497	0,394	0,0152	$1,711 \times 10^{-4}$	$8,472 \times 10^{-6}$	1,58	1,00	$0,443 \times 10^{-3}$
240	24,97	59,09	0,0612	952	1,013	0,503	0,394	0,0156	$1,625 \times 10^{-4}$	$8,611 \times 10^{-6}$	1,50	1,00	$0,462 \times 10^{-3}$
250	29,82	58,82	0,0723	946	1,015	0,509	0,395	0,0160	$1,544 \times 10^{-4}$	$8,611 \times 10^{-6}$	1,43	1,00	$0,480 \times 10^{-3}$
260	35,42	58,53	0,0850	939	1,018	0,516	0,395	0,0164	$1,472 \times 10^{-4}$	$8,861 \times 10^{-6}$	1,37	1,00	$0,497 \times 10^{-3}$
270	41,85	58,24	0,0993	932	1,020	0,523	0,395	0,0168	$1,406 \times 10^{-4}$	$9,000 \times 10^{-6}$	1,31	1,01	$0,514 \times 10^{-3}$
280	49,18	57,94	0,1156	926	1,023	0,530	0,395	0,0172	$1,344 \times 10^{-4}$	$9,111 \times 10^{-6}$	1,25	1,01	$0,532 \times 10^{-3}$
290	57-53	57,63	0,3390	918	1,026	0,538	0,395	0,0177	$1,289 \times 10^{-4}$	$9,250 \times 10^{-6}$	1,21	1,01	$0,549 \times 10^{-3}$
300	66,98	57,31	0,1545	910	1,029	0,547	0,394	0,0182	$1,236 \times 10^{-4}$	$9,389 \times 10^{-6}$	1,16	1,02	$0,566 \times 10^{-3}$
320	89,60	56,65	0,2033	895	1,036	0,567	0,393	0,0191	$1,144 \times 10^{-4}$	$9,639 \times 10^{-6}$	1,09	1,03	$0,636 \times 10^{-3}$
340	117,93	55,95	0,2637	880	1,044	0,590	0,391	0,0202	$1,063 \times 10^{-4}$	$9,889 \times 10^{-6}$	1,02	1,04	$0,656 \times 10^{-3}$
360	152,92	56,22	0,3377	863	1,054	0,617	0,389	0,0213	$9,972 \times 10^{-5}$	$1,013 \times 10^{-5}$	0,973	1,06	$0,681 \times 10^{-3}$
380	195,60	54,46	0,4275	845	1,065	0,647	0,385	0,0224	$9,361 \times 10^{-5}$	$1,041 \times 10^{-5}$	0,932	1,08	$0,720 \times 10^{-3}$
400	241,1	53,65	0,5359	827	1,078	0,683	0,382	0,0237	$8,833 \times 10^{-5}$	$1,066 \times 10^{-5}$	0,893	1,11	$0,771 \times 10^{-3}$
450	422,1	51,46	0,9082	775	1,121	0,799	0,370	0,0271	$7,722 \times 10^{-5}$	$1,130 \times 10^{-5}$	0,842	1,20	$0,912 \times 10^{-3}$
500	680,0	48,95	1,479	715	1,188	0,972	0,352	0,0312	$6,833 \times 10^{-5}$	$1,200 \times 10^{-5}$	0,830	1,35	$1,111 \times 10^{-3}$
550	1046,7	45,96	4,268	641	1,298	1,247	0,329	0,0368	$6,083 \times 10^{-5}$	$1,280 \times 10^{-5}$	0,864	1,56	$1,445 \times 10^{-3}$
600	1541	42,32	3,736	550	1,509	1,759	0,299	0,0461	$5,389 \times 10^{-5}$	$1,380 \times 10^{-5}$	0,979	1,90	$1,883 \times 10^{-3}$
650	2210	37,31	6,152	422	2,086	3,103	0,267	0,0677	$4,639 \times 10^{-5}$	$1,542 \times 10^{-5}$	1,30	2,54	
700	3090	27,28	13,44	168	13,80	25,90	0,254	0,1964	$3,417 \times 10^{-5}$	$2,044 \times 10^{-5}$	6,68	9,71	
705,44	3204	19,79	19,79	0	∞	∞	∞	∞	$2,897 \times 10^{-5}$	$2,897 \times 10^{-5}$			

Fonte: Çengel, Y. A. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática, 2009, p. 881. Tabela A-9E.

**ANEXO VIII – TABELA DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

Grupo	Material	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	
			Seco	Molhado
Metal	Alumínio	2800	204	204
	Cobre	9000	372	372
	Ligas	12250	35	35
	Aço, ferro	7800	52	52
	Zinco	7200	110	110
Pedra natural	Basalto, granito	3000	3.5	3.5
	Calcário, mármore	2700	2.5	2.5
	Arenito	2600	1.6	1.6
Alvenaria	Tijolo	1600-1900	0.6-0.7	0.9-1.2
	tijolo de Areia-cal	1900	0.9	1.4
		1000-1400	0.5-0.7	
Concreto	Concreto de cascalho	2300-2500	2.0	2.0
	Concreto leve	1600-1900	0.7-0.9	1.2-1.4
		1000-1300	0.35-0.5	0.5-0.8
		300-700	0.12-0.23	
	Concreto de pó de polimento	1000-1400	0.35-0.5	0.5-0.95
		700-1000	0.23-0.35	
	Concreto de isolamento	300-700	0.12-0.23	
	Concreto celular	1000-1300	0.35-0.5	0.7-1.2
		400-700	0.17-0.23	
	Concreto de escória	1600-1900	0.45-0.70	0.7-1.0
		1000-1300	0.23-0.30	0.35-0.5
Inorgânico	Cimento de asbesto	1600-1900	0.35-0.7	0.9-1.2
	Placa gipsita	800-1400	0.23-0.45	
	Cartão gipsita	900	0.20	
	Vidro	2500	0.8	0.8

	Lã de Vidro	150	0.04	
	Lã de rocha	35-200	0.04	
	Telhas	2000	1.2	1.2
Emplastros	Cimento	1900	0.9	1.5
	Cal	1600	0.7	0.8
	Gipsita	1300	0.5	0.8
Orgânico	Cortiça (expandida)	100-200	0.04-0.0045	
	Linóleo	1200	0.17	
	Borracha	1200-1500	0.17-0.3	
	Placa de fibra	200-400	0.08-0.12	0.09-0.17
Madeira	Folhosa	800	0.17	0.23
	Madeira leve	550	0.14	0.17
	compensada	700	0.17	0.23
	Cartão duro	1000	0.3	
	Soft-board	300	0.08	
	Cartão	500-1000	0.1-0.3	
	Cartão de madeira	350-700	0.1-0.2	
Sintéticos	Poliéster (GPV)	1200	0.17	
	Polietileno, Polipropileno	930	0.17	
	Cloreto de Polyvinyl	1400	0.17	
Espuma sintética	Espuma de poliestireno, exp. (Picosegundo)	10-40	0.035	
	Ditto, expulso	30-40	0.03	
	Espuma de poliuretano (PUR)	30-150	0.025-0.035	
	Espuma dura ácida do fenol	25-200	0.035	
	PVC-espuma	20-50	0.035	
Isolação de cavidade	Isolação da cavidade da parede	20-100	0.05	
Materiais betuminosos	Asfalto	2100	0.7	
	Betume	1050	0.2	
Água	Água	1000	0.58	

	Gelo	900	2.2	
	Neve, fresca	80-200	0.1-0.2	
	Neve, velha	200-800	0.5-1.8	
Ar	Ar	1.2	0.023	
Solo	Solo florestal	1450	0.8	
	Argila arenosa	1780	0.9	
	Solo arenoso úmido	1700	2.0	
	Solo (seco)	1600	0.3	
Revestimento de assoalho	Telhas de assoalho	2000	1.5	
	Parquet	800	0.17-0.27	
	Tapete de feltro de nylon	0.05		
	Tapete (com borracha de espuma)	0.09		
	Cortiça	200	0.06-0.07	
	Lãs	400	0.07	

Fonte: PROTOLAB - Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação protolab@protolab.com.br