

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

**Adriano José Longo**

**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO VISANDO O  
APROVEITAMENTO GEOTÉRMICO COMO FONTE RENOVÁVEL  
DE ENERGIA**

**Santa Maria, RS  
2019**

**Adriano José Longo**

**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO VISANDO O  
APROVEITAMENTO GEOTÉRMICO COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA**

Tese Apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD.

Santa Maria, RS  
2019

Longo, Adriano José

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO VISANDO O  
APROVEITAMENTO GEOTÉRMICO COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA  
/ Adriano José Longo.- 2019.

103 f.; 30 cm

Orientador: Félix Alberto Farret

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Instrumentação eletrônica 2. Eficiência energética  
3. Energia geotérmica superficial 4. Condicionamento  
geotérmico de ambientes I. Farret, Félix Alberto II.  
Título. |

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Adriano José Longo. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Santana Piccini, n. 750, 305, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. 97105-360  
Fone (55) 984038156; E-mail: [longoaj@hotmail.com](mailto:longoaj@hotmail.com)

**Adriano José Longo**

**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO VISANDO O  
APROVEITAMENTO GEOTÉRMICO COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA**

Tese Apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

**Santa Maria, em 29 de março de 2019:**

---

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

---

**Ademar Michels, Dr (FAHOR)**

---

**Miguel Neves Camargo, Dr (UFSM)**

---

**Carlos Roberto De Nardin, Dr (UFSM)**

---

**Frank Gonzatti, Dr (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que colaboraram para a realização desta tese, em especial à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), à Direção do Centro de Tecnologia e ao Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).

Ao orientador Prof. Felix Alberto Farret, pela amizade e confiança.

A todos os meus colegas de Laboratório em especial ao Dr. Felipe Teixeira Fernandes, Dr. Carlos Roberto De Nardin e ao Msc. Eng. Luciano Porto de Lima pelo inestimável apoio e colaboração que possibilitaram a realização deste trabalho.

À minha companheira Marilene e a minha adorável filha Luíza, pelo carinho e compreensão, sendo elas o meu grande estímulo para prosseguir no caminho.

Aos meus pais João e Dirce e toda minha família, pelo amor e respeito que sempre tiveram comigo.

Aos demais colegas do CEESP pela amizade e colaboração prestada.

## RESUMO

### DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO VISANDO O APROVEITAMENTO GEOTÉRMICO COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA

AUTOR: Adriano José Longo  
ORIENTADOR: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

O conhecimento das características térmicas do solo é indispensável para o dimensionamento de trocadores geotérmicos utilizados na climatização de ambiente e consequente diminuição no consumo de energia elétrica em equipamentos de ar condicionado. A presente tese tem como objetivo principal a avaliação do potencial geotérmico de solos genéricos através da determinação das suas características térmicas. Para isto é usada uma metodologia prática e recursos de controle, automação e aquisição de dados para fornecer subsídios ao estabelecimento das dimensões e da capacidade térmica necessária para os trocadores de calor atuar de forma contínua. Para avaliar a eficiência da metodologia proposta foi instalado na área experimental do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), no Campus da UFSM em Santa Maria – RS, um conjunto de trocadores de calor colocados no subsolo a diferentes profundidades. Para a aquisição da variaç foram instaladas no solo duas sondas com sensores digitais de temperatura desenvolvidas especialmente para este propósito. A primeira sonda com 0,5 metro foi usada para a medição das temperaturas mais superficiais que ocorrem no subsolo detectando as variações diárias de temperaturas. Esta sonda é composta de 5 sensores de temperatura que podem realizar medições em intervalos de 0,1 em 0,1 metro. A segunda sonda monitorou as variações de temperatura no solo até a profundidade de 5 metros e é composta de 11 sensores dispostos de 0,5 em 0,5 metro desde a superfície. Também foram feitos experimentos com um trocador de calor instalado a 5 metros de profundidade utilizando uma bomba hidráulica microcontrolada e sensores de fluxo e de temperatura. Os resultados demonstraram que os valores da difusividade térmica encontrados na análise dos ciclos diários são coerentes com as encontradas nos ciclos anuais, diferenciando-se pelo teor de umidade no perfil vertical.

**Palavras-chave:** Instrumentação eletrônica. Energia geotérmica superficial. Eficiência energética. Condicionamento geotérmico de ambientes.

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF SOIL CHARACTERISTICS AIMING AT ITS GEOTHERMAL USAGE AS A RENEWABLE SOURCE OF ENERGY

AUTHOR: ADRIANO JOSÉ LONGO  
SUPERVISOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Knowledge of the soil thermal characteristics is indispensable for dimensioning geothermal exchangers for air conditioning or yet to decrease their electric consumption. The present thesis evaluates the geothermal potential of generic soils by determining some thermal characteristics through a practical methodology, control automation and data acquisition resources in order to provide subsidies to establish the dimensions and capacity required of the heat exchangers to allow them a continuous operation. In order to evaluate the efficiency of the proposed methodology was installed in the experimental area of the Center of Excellence in Energy and Power Systems (CEESP), at the UFSM Campus in Santa Maria - RS, a set of heat exchangers placed underground in different depths. For the acquisition of data, two probes were specially developed with digital temperature sensors to be installed underground. The first 0.5 meter probe was used to measure the most superficial temperatures occurring in the soil to detect the daily temperature variations. The probe consists of 5 temperature sensors to perform measurements at 0.1 m intervals. The second probe monitored the temperature variations in the soil up to the depth of 5 meters, being composed of 11 sensors arranged 0.5 in 0.5 meters from the surface. Experiments were also conducted with a heat exchanger installed 5 meters deep, using a microcontrolled hydraulic pump, water flow and temperature sensors. The results showed that the values of thermal diffusivity found in the analysis of annual cycles are consistent with those found in the annual cycles, differentiated by the moisture content in the vertical profile.

**Keywords:** Electronic instrumentation. Surface geothermal energy. Energy efficiency. Geothermal conditioning of rooms.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da umidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) no perfil de solo em área de platô ..	244
Figura 2 – Variação da umidade no perfil do solo .....	244
Figura 3 – Variações térmicas do solo em diferentes horários de um mesmo dia (14/01/2018) Santa Maria - RS.....	28
Figura 4 – Sistemas fechados (A) vertical e (B) horizontal com GCHP .....	29
Figura 5 – Balanço energético do sistema sol-terra .....	34
Figura 6 – Transferência de calor por condução em tubos .....	41
Figura 7 – Esquema elétrico equivalente para a troca de calor geotérmica .....	433
Figura 8 – Transferência de calor por condução em tubo enterrado na profundidade Z .....	444
Figura 9 – Diagrama do experimento do trocador geotérmico .....	532
Figura 10 – Montagem do trocador geotérmico.....	543
Figura 11 – Detalhe da mangueira enterrada a 5 metros de profundidade.....	554
Figura 12 – Localização da placa de coletor solar no experimento .....	555
Figura 13 – Diagrama das sondas multisensoras .....	56
Figura 14 – Detalhes construtivos da sonda multisensora .....	576
Figura 15 – Diagrama de blocos do controle e da aquisição de dados .....	598
Figura 16 – Temp. médias diárias no período de set/2013 até ago/2014, nas diversas profundidades, até 5 metros.....	632
Figura 17 – Temperaturas médias diárias no período de out/2016 até set/2017.....	632
Figura 18 – Variação térmica do solo em diferentes horários de um mesmo dia (22/09/2013) Local: CEESP-UFSM em Santa Maria-RS .....	643
Figura 19 – Ciclos diários de temp. no solo no período de 26 a 30 de janeiro de 2018 .....	654
Figura 20 – Valores da difusividade aparente obtidos no ciclo anual 2013/14 .....	687
Figura 21 – Valores da difusividade aparente obtidos no ciclo anual 2016/17 .....	709
Figura 22 – Difusividade Aparente do solo nos ciclos 2013/14 e 2016/17 pelos métodos Numérico de Diferenças Finitas - NUM e Arcotangente - AMP2 .....	700
Figura 23 – Método da Amplitude - AMP1 .....	743
Figura 24 – Método do Arcotangente - AMP2 .....	743
Figura 25 – Método da Fase Direta - PHA1 .....	754
Figura 26 – Método do Logaritmo - PHA2.....	754
Figura 27 – Métodos Numéricos de Diferenças Finitas -NUM .....	763
Figura 28 – Resultado da difusividade em ciclos anuais e diários.....	776
Figura 29 – Trocadores de calor geotérmicos .....	798
Figura 30 – Resultados do dia 13/09/2015.....	798
Figura 31 – Resultado do dia 15/09/2015 .....	800
Figura 32 – Resultado do dia 30/10/2015 .....	81
Figura 33 – Temperaturas do solo e da entrada e saída da água do trocador geotérmico.....	844
Figura 34 – Potência média dissipada pelo trocador geotérmico - 5 metros .....	844



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Formato dos dados diários de temperatura em °C, obtidos da sonda térmica padrão para as diversas profundidades .....	61
Quadro 2 – Médias diárias (°C).....	621
Quadro 3 – Difusividade Térmica Aparente do Solo (m <sup>2</sup> /s) - Ciclo Anual 2013/14 .....	676
Quadro 4 – Difusividade Térmica Aparente do Solo (m <sup>2</sup> /s) - Ciclo Anual 2016/17 .....	698
Quadro 5 – Dias utilizados no cálculo da difusibilidade pelo ciclo diário .....	70
Quadro 6 – Difusividade Térmica Aparente do Solo (m <sup>2</sup> /s) - Ciclos Diários .....	71
Quadro 7 – Médias da Difusividade Térmica Aparente do Solo (m <sup>2</sup> /s) - Ciclos Diários.....	732
Quadro 8 – Resultados obtidos no experimento .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Projeção de consumo no Brasil de eletricidade na rede, por classe (GWh) .....	14
Tabela 2 –	Projeção de consumo de energia elétrica por serviço no setor residencial (GWh).....	14
Tabela 3 –	Matriz elétrica brasileira em GWh .....	15
Tabela 4 –	Condutividade térmica, capacidade térmica e difusividade térmica para diferentes tipos de solo .....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABIAP	Assoc. Brasileira de Investidores Autoprodutores de Energia
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BHE	<i>Borehole Heat Exchanger</i>
CC	Corrente contínua
CC-CC	Corrente contínua-Corrente continua
CEESP	Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência
COP	Coefficiente de desempenho
EGS	Energia geotérmica superficial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GSHP	<i>Ground source heat pump</i>
HCC	<i>Hill climbing control</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
INMET	Instituto Nacional de Metrologia
LCD	<i>Liquid cristal display</i>
MME	Ministério das Minas e Energia
PVC	Policloreto de vinila
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
RHC	<i>Renewable heating and cooling</i>
RTC	<i>Real time clock</i>
SGE	<i>Shallow geothermal energy</i>
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos gerais	16
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	19
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	19
2.2	REVISÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL DO SOLO	20
2.3	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	22
2.3.1	Conteúdo de água no solo	22
2.3.2	Variação do regime de infiltração com o tempo (teor de água)	23
2.4	REVISÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS	233
2.4.1	Condução	25
2.4.2	Convecção	25
2.4.3	Radiação	266
2.4.4	Evaporação/condensação	26
2.5	APROVEITAMENTO DA ENERGIA GEOTÉRMICA	26
2.5.1	Sistemas fechados	299
2.6	DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR NO SOLO	31
2.7	RESUMO DO CAPÍTULO 2	322
<b>3</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECIMENTO DO SOLO</b>	344
3.1	INTRODUÇÃO	344
3.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO SOLO	344
3.3	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	355
3.3.1	Capacidade térmica volumétrica	366
3.3.2	Condutividade térmica do solo	377
3.3.3	Resistividade térmica	388
3.3.4	Capacidade térmica	388
3.3.5	Calor específico ou capacidade térmica mássica	399
3.3.6	Difusividade térmica do solo	399
3.4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO EM TUBOS	40
3.4.1	Determinação da resistência térmica na parede cilíndrica	42
3.4.2	Transferência de calor combinado em sistemas radiais	433
3.5	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE APARENTE DO SOLO	46
3.5.1	Método da Amplitude Direta (AMP1)	477
3.5.2	Método do Arcotangente (AMP2)	499
3.5.3	Métodos da Fase Direta (PHA1)	50
3.5.4	Método do Logaritmo (PHA2)	50
3.5.5	Método Numérico das Diferenças Finitas (NUM)	51
3.6	RESUMO DO CAPÍTULO 3	511
<b>4</b>	<b>TESTES EXPERIMENTAIS</b>	533
4.1	TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO HORIZONTAL	544
4.2	PLACA DO COLETOR SOLAR	555
4.3	INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA DESENVOLVIDA PARA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉRMICOS	56

4.3.1	<b>Sondas multisensoras para medição geotérmica</b> .....	566
4.4	<b>MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA</b> .....	588
4.5	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS</b> .....	588
4.6	<b>RESUMO DO CAPÍTULO 4</b> .....	599
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DO EXPERIMENTO</b> .....	<b>61</b>
5.1	<b>LEVANTAMENTO DE DADOS</b> .....	61
5.1.1	<b>Medições do Ciclo Anual</b> .....	611
5.1.2	<b>Medições do Ciclo Diário</b> .....	64
5.2	<b>DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE APARENTE DO SOLO</b> .....	65
5.2.1	<b>Ciclo Anual</b> .....	66
5.2.2	<b>Ciclos Diários</b> .....	700
5.2.3	<b>Comparação entre os valores obtidos nos ciclos diário e anual</b> .....	76
5.3	<b>ENERGIA TROCADA NO SISTEMA GEOTÉRMICO</b> .....	77
5.3.1	<b>Densidade de Fluxo de calor</b> .....	83
5.3.2	<b>Aumento da temperatura do solo no entorno do trocador geotérmico</b> .....	833
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>866</b>
6.1	<b>PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES</b> .....	877
6.2	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	888
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	899
	<b>APÊNDICE</b> .....	944
	<b>APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO UTILIZADA PARA O CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE APARENTE DO SOLO</b> .....	955
	<b>ANEXOS</b> .....	999
	<b>ANEXO A - ANÁLISE FÍSICA DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	100
	<b>ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20</b> .....	101
	<b>ANEXO C - PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS MICROCONTROLADA</b> ..	102
	<b>ANEXO D - CARACTERÍSTICAS DA BOMBA D'ÁGUA</b> .....	1033

## 1 INTRODUÇÃO

Existe atualmente uma preocupação de toda a sociedade com relação ao consumo racional de energia. Este fato despertou uma busca em melhorar a eficiência energética e aumentar a participação das fontes renováveis de energia elétrica, além de se propalar uma motivação para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e limpas. Entre estas fontes renováveis está a energia geotérmica superficial (EGS) que é uma fonte renovável ainda pouco difundida no Brasil, mas muito utilizada e pesquisada no exterior para condicionamento da temperatura de ambientes internos e aquecimento de água, entre outras aplicações, com o objetivo de contribuir para a redução do consumo da energia elétrica. O uso da EGS em residências é baseado na troca de calor entre a habitação e a camada superficial do solo até uma profundidade típica de 5 metros. Com ela a eficiência energética de edificações ou de pequenas empresas poderá ser melhorada através da suavização e redução da curva de carga em horários críticos de maior consumo pela diminuição do uso de energia elétrica na climatização de ambientes e no aquecimento de água.

Outra aplicação da EGS é que ela pode também funcionar como um acumulador de energia térmica, além de poder ser usada em outros processos que realizem trocas térmicas com o solo. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética, EPE-2016, os consumidores residenciais correspondem atualmente a 28% da energia elétrica consumida no Brasil, onde aproximadamente um terço desse valor é consumido para aquecimento de água e condicionamento térmico de ambiente. Ainda segundo a EPE-2016, na Tabela 1 vemos que as projeções apontam para um crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil na faixa de 3,8 % ao ano até 2020, o que leva a uma inevitável necessidade urgente de investimento na produção de energia elétrica e no estímulo ao uso de outras fontes de energia. Atingir esta meta envolve a diversificação da matriz energética tais como uma aposta na geração eólica, nas pequenas hidrelétricas, energia solar, biomassa, geotérmica, entre outras.

A Tabela 2 mostra que nos próximos anos a climatização residencial possuirá a maior projeção de crescimento e impacto no consumo de energia elétrica residencial com possibilidade de consumir mais de 35% da energia elétrica do setor residencial até 2050.

Em relação à geração de eletricidade no Brasil, as hidrelétricas são ainda as fontes que mais contribuem para a malha elétrica sendo responsáveis por 66% da produção, segundo a ANEEL (2018), consulta em 09/11/2018. No entanto, essa matriz ainda é pouco diversificada não garantindo segurança energética e ficando muitas vezes sob o risco de problemas de abastecimento, como a da crise enfrentada pelo Brasil em 2015, onde a falta de planejamento, diminuição dos níveis dos rios e o aumento da demanda de energia foram as principais causas.

Tabela 1 – Projeção de consumo no Brasil de eletricidade na rede, por classe (GWh)

Ano	Resid.		Ind.		Comerc.		Outros		Total
2015	31.100	28,22%	169.942	36,58	90.190	19,41%	73.278	15,77%	464.510
2016	133.768	28,67%	165.814	35,54%	92.144	19,75%	74.806	16,03%	466.532
2017	138.990	28,75%	170.092	35,19%	96.257	19,91%	77.939	16,12%	483.279
2018	144.877	28,80%	175.762	34,94%	100.914	20,08%	81.398	16,18%	502.951
2019	151.045	28,87%	181.239	34,65%	105.715	20,06%	85.015	16,25%	523.014
2020	158.278	28,71%	192.119	34,35%	111.621	20,21%	89.111	16,32%	551.129
Variação (% ao ano)									
2015-20	3,8		2,5		4,4		4,0		3,5

Fonte: Estudos da Demanda. Nota Técnica DEA 19/15, pag.56 - EPE -Ministério de Minas e Energia - 2015

Tabela 2 – Projeção de consumo de energia elétrica por serviço no setor residencial (GWh)

Equipamento	2020		2030		2040		2050	
Climatização	42.427	25,7%	67.568	29,0%	96.189	32,3%	123.302	35,6%
Cocção	1.840	1,1%	3.003	1,3%	4.357	1,5%	5.672	1,6%
Aquec. de agua	21.288	12,9%	24.627	10,6%	24.538	8,2%	20.455	5,9%
Refrigeração	38.561	23,4%	50.408	21,6%	59.279	19,9%	62.939	18,2%
Entretenimento	28.929	17,5%	48.024	20,6%	70.581	23,7%	92.792	26,8%
Outros serviços	14.111	8,6%	20.714	8,9%	27.493	9,2%	33.156	9,6%
Iluminação	17.754	10,8%	18.589	8,0%	15.477	5,2%	8.354	2,4%
<b>Total</b>	<b>164.910</b>	<b>100%</b>	<b>232.934</b>	<b>100%</b>	<b>297.914</b>	<b>100%</b>	<b>346.670</b>	<b>100%</b>

Fonte: Nota Técnica DEA 13/2015, pag. 197 - Empresa de Pesquisa Energética - Ministério de Minas e Energia

Segundo o Departamento de Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia - MME, o Brasil tem avançado lentamente na expansão de novas fontes de energia, ao contrário dos países europeus onde as legislações rigorosas fazem com que exista a necessidade de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa. Com isto, o potencial limitado para gerar as energias renováveis levou a um desenvolvimento sofisticado das novas matrizes de geração como a fotovoltaica e a eólica. Ainda, segundo o MME, as projeções mostram que as energias renováveis serão largamente utilizadas mundialmente no futuro para geração de energia elétrica. O Brasil também caminha no sentido de expandi-las. Conforme informa o MME, o governo brasileiro avalia que em termos de administração e de operação da complexa rede de energia nacional é preciso ter várias fontes ofertando em diversos momentos do dia e se complementando tanto quanto for necessário.

Baseado na lógica da complementariedade das fontes de energia é que se tem investido em energia renovável no sentido de que elas ganhem espaço cada vez maior. No entanto, os dados do Boletim de Capacidade Instalada de Geração Elétrica - Brasil e Mundo 2016, do Ministério de Minas e Energia, ainda não demonstram esse movimento. Segundo a Associação Brasileira dos Investidores em Autoprodução de Energia (ABIAPE), embora o setor tenha um planejamento indicativo, a expansão ocorre majoritariamente nas fontes que oferecem o menor custo. No caso da matriz elétrica brasileira, Tabela 3, apesar da variedade e possibilidade de utilização de todas as fontes, existem fatores como o baixo custo e a facilidade de estocagem que ainda favorecem as hidrelétricas. Porém, esse quadro vem sofrendo lentas mudanças devido a outros fatores como a limitação das construções de hidrelétricas em função da questão ambiental e também, por ocorrerem secas severas em algumas regiões do país. A região nordeste ainda vem sofrendo bastante com falta de água nos últimos anos, mas mesmo assim conseguiu evitar um racionamento em função da disponibilidade da energia eólica. A EPE no seu Balanço Energético Nacional de 2017 informa que a participação da geração eólica na matriz elétrica brasileira no final de 2016 foi de 6 % no entanto, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica - ABEEólica (2017) a participação foi de 7,12%, sendo que o nordeste contribuiu com 84,7 % desse valor, fornecendo cerca de 30% da necessidade de energia elétrica daquela região.

Tabela 3 – Matriz elétrica brasileira em GWh

	2012		2013		2014		2015		2016	
<b>Total</b>	<b>552.498</b>	100%	<b>570.835</b>	100%	<b>590.542</b>	100%	<b>581.228</b>	100%	<b>578.898</b>	100%
<b>Hidráulica (i)</b>	<b>415.342</b>	75%	<b>390.992</b>	68%	<b>373.439</b>	63%	<b>359.743</b>	62%	<b>380.911</b>	66%
<b>Gás Natural</b>	<b>46.760</b>	8%	<b>69.003</b>	12%	<b>81.073</b>	14%	<b>79.490</b>	14%	<b>56.485</b>	10%
<b>Petróleo (ii)</b>	<b>16.214</b>	3%	<b>22.090</b>	4%	<b>31.529</b>	5%	<b>25.657</b>	4%	<b>12.103</b>	2%
<b>Carvão</b>	<b>8.422</b>	2%	<b>14.801</b>	3%	<b>18.385</b>	3%	<b>18.856</b>	3%	<b>17.001</b>	3%
<b>Nuclear</b>	<b>16.038</b>	3%	<b>15.450</b>	3%	<b>15.378</b>	3%	<b>14.734</b>	3%	<b>15.864</b>	3%
<b>Biomassa (iii)</b>	<b>34.662</b>	6%	<b>39.679</b>	7%	<b>44.987</b>	8%	<b>47.394</b>	8%	<b>49.236</b>	9%
<b>Eólica</b>	<b>5.050</b>	1%	<b>6.578</b>	1%	<b>12.201</b>	2%	<b>21.626</b>	4%	<b>33.489</b>	6%
<b>Outras</b>	<b>10.010</b>	2%	<b>12.241</b>	2%	<b>13.540</b>	2%	<b>13.728</b>	2%	<b>13.809</b>	2%

Notas:

i) Inclui autoprodução

ii) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível

iii) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia

iv) Outras: gás de coque, outras secundárias, outras não renováveis, outras renováveis e solar

Fonte: Balanço Energético Nacional 2017; Elaboração: EPE.



O aproveitamento da EGS está diretamente ligado à radiação solar que penetra no solo, portanto estará sempre disponível. Assim sendo, o desenvolvimento de habilidades que permitam o melhor aproveitamento do fluxo de calor do solo em um determinado sítio é de grande importância para os estudos em geotermia de superfície.

A EGS pode ser usada para aquecimento e arrefecimento em edificações, além de vários outros usos diretos, conforme afirma a European Geothermal Energy Council (EGEC). Tais aplicações são muito desejadas do ponto de vista do aproveitamento energético por diminuir o uso de eletricidade para tais fins.

O aproveitamento da EGS possui potencial de exploração em quase todo o planeta e depende apenas das características térmicas e geológicas do subsolo local. Esta energia está armazenada em baixas profundidades e devido às suas características térmicas de baixa condutividade não se alteram rapidamente em relação ao meio externo. Este aproveitamento pode ser visto como uma forma de energia contínua, disponível em tempo integral, além de ser ecologicamente limpa.

Um experimento com transferência de energia térmica do solo realizado por De Nardin (2015), utilizando trocadores de calor geotérmico superficial para arrefecer uma habitação, demonstrou que é necessário um correto dimensionamento de uma planta de EGS, o que inclui o conhecimento das características térmicas do solo. Durante os períodos mais quentes do verão, neste experimento específico, houve aquecimento do solo em torno do trocador em função da alta demanda térmica, afetando o seu desempenho.

O foco desta tese é contribuir com informações técnicas, métodos e procedimentos que facilitem a obtenção de informações sobre as características térmicas do solo de tal forma a tornar possível projetar adequadamente os trocadores de calor, maximizando o aproveitamento da energia geotérmica superficial. O uso dessa energia na climatização de ambientes e aquecimento de água contribui para a diminuição do consumo de energia elétrica pela redução ou eliminação da necessidade dos condicionadores de ar tradicionais. Com isto, a energia geotérmica superficial contribui para a diversificação da matriz energética nacional, aumentando o leque das energias renováveis.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos gerais

Obter dados que permitam caracterizar o fluxo de calor no solo para dimensionar de forma mais eficiente os trocadores geotérmicos objetivando a diminuição ou substituição de equipamentos elétricos para climatização de habitações e arrefecimento de painéis PV, entre outros fins.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Esta tese visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Estabelecer as bases da instrumentação eletrônica para o desenvolvimento e construção de sondas térmicas para monitoramento de forma continuada e sistemática do perfil vertical do solo.
- b) Utilização de métodos matemáticos para determinar a difusividade térmica aparente do solo através da análise da variação de temperatura na camada superficial do solo.
- c) Relacionar os valores de difusividade do solo encontrado através do ciclo diário com os obtidos no ciclo anual.
- d) Realizar testes com um trocador geotérmico buscando definir sua capacidade de troca no solo analisado.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Nesta tese, os capítulos estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução. Apresenta-se uma breve discussão sobre o consumo e projeção de consumo da energia elétrica residencial no Brasil abordando a matriz elétrica brasileira e a utilização da energia geotérmica juntamente com os objetivos desta tese.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica. São apresentadas as revisões acerca das características térmicas do solo e os principais fatores que influenciam a distribuição de temperatura no perfil vertical. Mostra também as características da energia geotérmica superficial e tipos de configurações possíveis para o seu aproveitamento.

Capítulo 3: Neste capítulo fez-se uma revisão bibliográfica referente às pesquisas do comportamento térmico superficial do solo e dos fenômenos físicos envolvidos. São apresentados os cálculos que definem as principais características térmicas do solo. São abordadas as equações de transferência de calor em paredes cilíndricas e as de transferências

de calor combinadas em sistemas radiais e finalmente discutidos os métodos analíticos de obtenção da difusividade aparente do solo.

Capítulo 4: Descrição dos experimentos práticos, a construção e instalação dos trocadores geotérmicos e as bases da instrumentação eletrônica para a construção das sondas multisensoras necessárias para a medição do perfil geotérmico, o controle do fluxo de água e a aquisição de dados.

Capítulo 5: Análise dos resultados dos experimentos usados no levantamento geotérmico com medições do ciclo anual, ciclo diário, quantidades de energias trocadas e a determinação da difusividade aparente do solo.

Capítulo 6: Conclusões finais, com um resumo da análise dos resultados obtidos nesta tese através dos métodos propostos e as contribuições para esta área do conhecimento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Florides e Kalogirou (2005), a variação da temperatura do solo diminui conforme aumenta a profundidade e permanece constante a partir dos 10 a 20 metros, dependendo da umidade e da composição do solo. Segundo Sanner (2001) em profundidades maiores, esta temperatura constante passa a aumentar de acordo com o gradiente geotérmico, em média, 3 °C para cada 100 m de profundidade. Esta temperatura aproximadamente constante próxima da superfície tenderá para a temperatura média anual da superfície no local em análise, sendo que as oscilações diárias mais pronunciadas estão a menos de 1 m da superfície, segundo Vieira e Maranhã (2009). Segundo Longo et al. (2014), que realizou medidas a 5 m de profundidade, a temperatura do solo no Campus Experimental do CEESP em Santa Maria - RS, a variação ficou entre 18,9 e 22,2 °C no período de setembro de 2013 até agosto de 2014. Conforme o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média anual na cidade de Santa Maria-RS é de 19,5 °C usando como estimativa a equalização das variações sazonais neste local.

Para locais onde a temperatura média anual está dentro da faixa de conforto térmico humano, entre 18 e 30 °C e de 30 a 80% de umidade relativa do ar conforme Águas (2000), e assim é possível utilizar essa energia diretamente em sistemas de climatização de ambientes. Em locais onde as temperaturas médias anuais estão fora desta zona de conforto térmico é necessário utilizar bombas de calor (Ground Source Heat Pumps - GSHP) para obter temperaturas de operação adequadas à climatização.

De acordo com Farouki (1986), as informações sobre as características térmicas do solo são necessárias em aplicações de diferentes domínios, como durante a construção de rodovias, transmissão de energia através de cabos enterrados e vários outros tipos de estruturas e infraestruturas. Mais recentemente está se buscando esse conhecimento para a determinação do potencial dos recursos geotérmicos superficiais, em particular para seu aproveitamento em climatização com sistemas GSHP. A utilização deste tipo de dispositivo já vem acontecendo em diversos países, principalmente para a climatização de habitações de uma ou mais famílias, pontos comerciais e infraestruturas subterrâneas, como as estações de metrô e shopping centers subterrâneos (LUND et al., 2011; OMER, 2008).

A EGS utilizada para aquecimento e arrefecimento de ambientes recorre frequentemente a bombas de calor, sendo que uma das primeiras foi desenvolvida por Lord Kelvin em 1852, sendo que mais tarde, na década de 40, R. Webber instalou a primeira bomba de calor para fins geotérmicos numa habitação, conforme afirma Johnston et al. (2011),

Self et al. (2013) referem os EUA, a Alemanha, a Suíça, a Suécia e a Austrália como os líderes atuais no aproveitamento da EGS através de GSHP. De acordo com a European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (RHC) (2011), no ano de 2007, em torno de 48% da energia eléctrica consumida em toda a Europa teve como finalidade a produção de calor das quais 56% foram utilizadas em habitações e serviços e os restantes 44% na indústria de altas e baixas temperaturas.

## 2.2 REVISÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL DO SOLO

O fluxo de calor no subsolo é dependente principalmente da absorção de energia solar na superfície e apresenta variações em função da localização e do tipo de cobertura existente no local. A oscilação da temperatura na camada superficial apresenta um ciclo diário e outro anual. Essas defasagens se explicam pela constante de tempo do fluxo de calor no interior do solo o qual é relativamente lento. Assim, a máxima ou a mínima temperatura do solo em cada profundidade ocorrerá com uma defasagem de tempo ao longo do dia ou do ano. Essa defasagem varia conforme as características térmicas específicas do solo e sua localização no mapa geográfico do planeta. Geiger (1980), Reichardt e Timm (2004) descrevem um modelo de variação de temperatura considerando um perfil de solo sem vegetação, homogêneo, com densidade e umidade constantes ao longo de uma profundidade  $z$ , exposta à radiação. A partir da equação 2.1 é definido a temperatura da superfície ( $z = 0$ ) de um solo e em função do tempo pela Equação 2.2.

$$T(z, t) = \bar{T} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{z}{d_n}} \left( a_n \cos \left( wnt - \frac{z}{d_n} \right) + b_n \sin \left( wnt - \frac{z}{d_n} \right) \right) \quad (2.1)$$

$$T(0, t) = \bar{T} + T_0 \sin \omega t \quad (2.2)$$

onde  $\bar{T}$  é a temperatura média (diária/anual),  $T_0$  é a amplitude da temperatura do solo na superfície ao longo do dia (diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima do dia) (°C),  $\omega$  é a velocidade angular da Terra ( $2\pi/24$ ) rad.h<sup>-1</sup> e  $t$  é o tempo (horas).

Em uma profundidade muito grande, a radiação solar não causa variação na temperatura do solo com o passar do tempo e a equação (2.2) se reduz a equação (2.3) em que a temperatura na região profunda será igual a temperatura média da superfície.

$$T(\infty, t) = \bar{T} \quad (2.3)$$

Os parâmetros físicos básicos para determinação do aproveitamento do calor do subsolo são a temperatura do perfil vertical e a difusividade térmica do solo. Conforme Prevedello (1996), para a caracterização do regime térmico do solo é preciso estabelecer sua localização, pois ela está diretamente ligada à condição climática local e ao tipo de solo. Esses dois parâmetros são altamente variáveis, sendo que os tipos de solo podem ser bastante diferentes numa mesma região e profundidade, assim como as características climáticas. No entanto, ambos os fatores apresentam valores limites, concentrando-se em dois grandes grupos:

- Tipo de solo
- Fatores externos

A identificação dos tipos de solos sob o aspecto geotérmico depende de uma série de grandezas que caracterizam as suas propriedades físicas. Estas, por sua vez, determinam o comportamento das propriedades térmicas, onde as mais importantes são a massa específica ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $k$ ) e capacidade térmica ( $C$ ). A partir do conhecimento destes valores é possível determinar-se a difusividade.

$$D = \frac{k}{\rho C} \quad (2.4)$$

A influência de fatores externos ao solo tais como as condições climáticas e a cobertura da área, traduzem os fluxos energéticos que ocorrem na superfície do mesmo. Os dados climáticos dependem de um conjunto considerável de parâmetros que devem ser

analisados. Conclui-se que o comportamento térmico do solo implica na consideração de uma quantidade elevada de variáveis.

### 2.3 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A infiltração de água no solo é um processo físico complexo, pois o solo é um meio heterogêneo, podendo apresentar alterações diferenciadas no tempo e no espaço de suas características, conforme Reichter et al. (1992). O processo de infiltração inicia quando a água penetra no perfil do solo. No começo, o volume infiltrado é mais elevado, decrescendo com o tempo e tornando-se constante no momento em que o solo chega à saturação, segundo Sobrinho et al. (2003). As características do solo, os fenômenos de entrada de água pela superfície, bem como a transmissão por intermédio do perfil e a capacidade de armazenamento do solo definem a infiltração e o escoamento na superfície do terreno que influenciam a temperatura subterrânea no local.

#### 2.3.1 Conteúdo de água no solo

O teor de umidade do solo tem efeitos importantes e complexos nas propriedades térmicas dos solos. O deslocamento de água no solo geralmente se processa na forma líquida podendo também ser na forma de vapor. Estes fenômenos alteram as propriedades térmicas do solo devido a variação na sua quantidade e mudança de estado, pois os gradientes de temperatura do solo induzem a movimentação da água no mesmo. O fluxo de calor e a umidade também interagem de forma complexa nos efeitos da temperatura do solo, uma vez que esta determina a distribuição das fases da água, seu movimento e o grau de sua interação junto aos minerais sólidos dos solos, segundo Farouki (1986).

A variação no conteúdo de água no solo produz uma variação na condutividade térmica e que por consequência afeta a distribuição da temperatura no solo. Há um aumento da condutividade térmica do solo com a elevação do conteúdo de água, pois os espaços vazios presentes na estrutura são preenchidos pela água que possui maior condutividade térmica do que o ar que foi expulso, conforme Farouki (1986).

Quanto maior a condutividade térmica menor será a variação de temperatura da superfície e maior será o armazenamento de calor. A condutividade térmica do solo depende da textura, da porosidade e da umidade. Por isso, ela varia de solo para solo e para um mesmo

solo de acordo com o seu conteúdo de água. Fica evidente que o teor de umidade é um fator que afeta significativamente a condutividade térmica do solo, segundo Decico (1974).

### **2.3.2 Variação do regime de infiltração com o tempo (teor de água)**

O regime de infiltração de água em um solo com perfil homogêneo é decrescente e tende a se estabelecer num determinado nível, caracterizando um equilíbrio dinâmico em torno de um valor constante, que é usualmente denominado capacidade ou velocidade de infiltração básica.

Um experimento realizado por Ferreira (2007), na região amazônica em um platô com solo do tipo latossolo amarelo, mediu o perfil da umidade volumétrica do solo, utilizando uma sonda de nêutrons que se caracterizava por permitir a obtenção dos valores de umidade do solo no mesmo ponto e a qualquer tempo sem deformar o solo, entre outras vantagens. Foram realizadas medidas da umidade volumétrica nas profundidades de 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120 e 140 cm. As leituras foram feitas semanalmente com uma sonda de nêutrons (Modelo IH Didcot Instrument Co, Abingdon, Inglaterra). As medidas de umidade do solo foram iniciadas em 03 de agosto de 2006 (época seca) até o dia 07 de fevereiro de 2007 (época chuvosa). Na Figura 1, são apresentados os valores do comportamento da umidade no período seco e chuvoso do perfil do platô. Com este experimento foi possível constatar que a umidade do solo tende a ter maior variação na camada mais superficial, tornando-se mais estável com o aumento da profundidade.

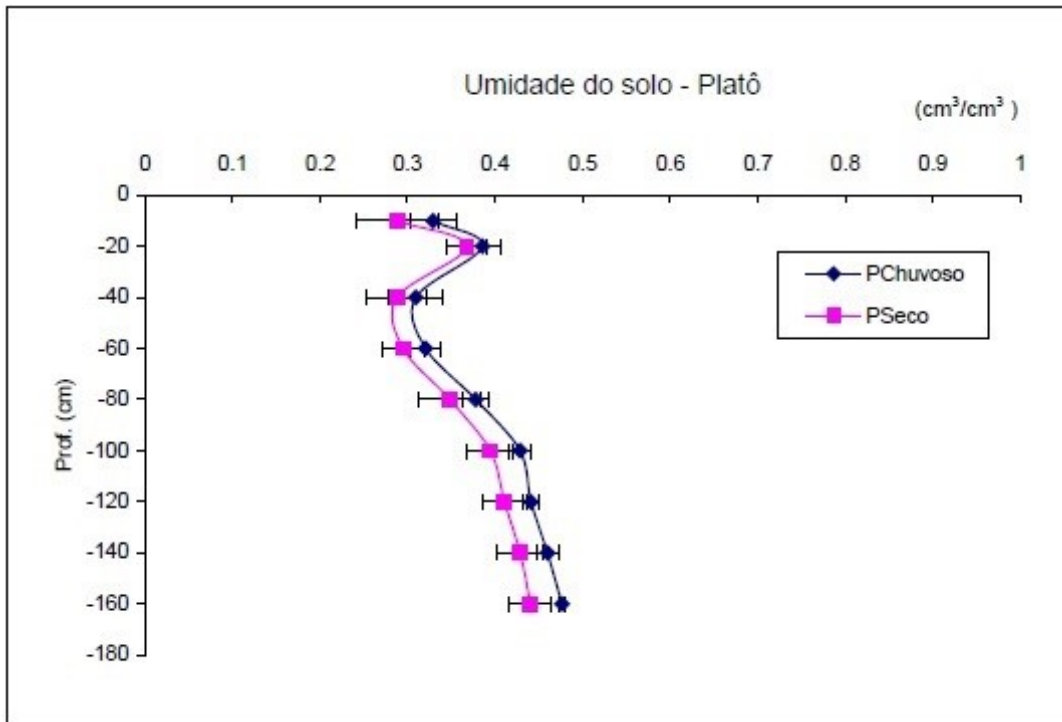
Outro experimento foi realizado por Souza (2002) usando o Método TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) com uma multi-haste segmentada para medição da umidade do solo em várias profundidades nos meses de julho e agosto de 1998. O solo era do tipo argiloso, como visto na Figura 2, e o estudo demonstrou também uma maior concentração de umidade logo abaixo da superfície, na faixa entre 20 e 30 centímetros de profundidade.

## **2.4 REVISÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS**

Na superfície dos solos ocorrem continuamente mudanças de temperatura devida às variações climáticas e à direção do fluxo de calor geotérmico do interior do solo para a superfície ou vice-versa.

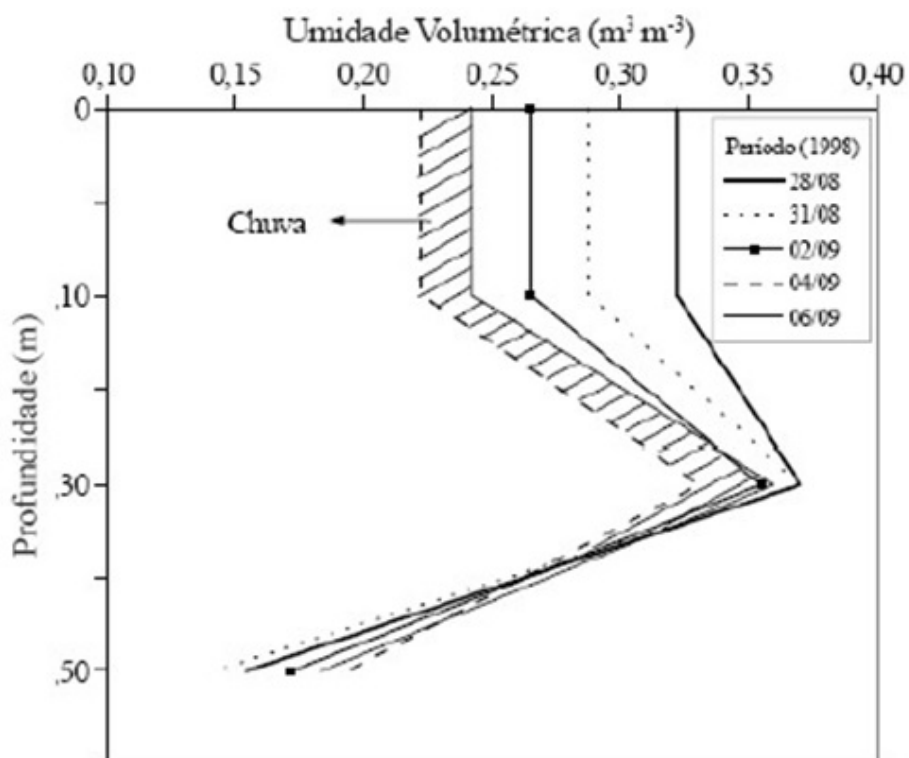


Figura 1 – Variação da umidade do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) pela profundidade do solo em área de platô



Fonte: Ferreira (2007).

Figura 2 – Variação da umidade no perfil vertical do solo



Fonte: Souza (2002).

O conhecimento das características do fluxo de calor do solo é de fundamental importância em diversas áreas do conhecimento, como a geotécnica, que relaciona o transporte de fluidos aquecidos em tubulações subterrâneas, o aproveitamento de energia geotérmica, o resfriamento de condensadores em usinas termoeletricas e nucleares, problemas de aterramento de cabos elétricos subterrâneos, entre muitos outros. De acordo com Oliveira Jr (1993), na transmissão de energia elétrica feita por cabos subterrâneos, a passagem da corrente elétrica provoca perdas de energia que aparecem na forma de calor, o qual é dissipado no solo que envolve os cabos. O dimensionamento dos cabos elétricos depende principalmente da carga elétrica a que ele está sujeito e da capacidade do solo em remover o calor gerado com a passagem da corrente elétrica.

Segundo Prevedello (1996), a capacidade do solo em armazenar e transferir calor é determinada pelas suas propriedades térmicas e condições meteorológicas. A transmissão de calor se dá basicamente de quatro modos distintos: condução, convecção, radiação e evaporação/condensação. Esses quatro mecanismos de transmissão de calor estão descritos a seguir.

#### **2.4.1 Condução**

A condução de calor de um material ocorre via colisões e vibrações entre átomos e moléculas da substância e a subsequente transferência de energia cinética. O calor passa de um ponto para outro sem movimentação desse meio. É o caso comum da transmissão através de sólidos. Esse fenômeno se verifica em todos os constituintes do solo na parte sólida, na água e no ar. A umidade aumenta o grau de saturação do solo e a quantidade de calor transferida pela condução também aumenta, conforme Farouki (1965), pois há um maior contato entre as partículas sólidas e assim a água conduz melhor o calor do que o ar.

#### **2.4.2 Convecção**

Na convecção, o calor se transmite por partículas que se movimentam de um local para outro dentro do meio em que estão. A convecção é o fluxo de calor devido a um movimento macroscópico das moléculas e átomos ou conjunto deles, carregando partes da substância de uma região quente para uma região fria. A convecção natural (ou convecção livre) é a que acontece sem ação de agentes externos, e o movimento se dá apenas pela diferença de densidade entre as partículas. Na convecção forçada o movimento é provocado predominantemente pela ação de agentes externos, assim como por diferenças de pressão.

Segundo Johansen (1975), os fenômenos de convecção têm certa relevância para as trocas de calor que podem ser verificados em solos arenosos ou em areias saturadas.

### **2.4.3 Radiação**

Na radiação, a transmissão de calor ocorre sem contato físico entre os corpos, mas através de ondas eletromagnéticas. O calor é transmitido entre dois corpos que estão com diferentes temperaturas, mesmo sem qualquer meio físico entre os mesmos. De acordo com Farouki (1965), a radiação em solos é normalmente desprezada, sendo que o seu efeito em areias é menor que 1% da transferência total de calor a temperaturas atmosféricas normais. No entanto, em materiais como pedregulhos, seu efeito é notável.

### **2.4.4 Evaporação/condensação**

A evaporação da água é provocada pelo aumento de temperatura em certas regiões de solos não saturados, com o conseqüente aumento da pressão do vapor local. O vapor de água se transporta da região de maior pressão para as regiões de menor pressão através da difusão, se condensando nestas regiões. Através desse processo, uma quantidade significativa de calor pode ser transferida. Segundo Duarte (2004) a diminuição da massa específica seca dos solos aumenta a influência da difusão do vapor de água pelo aumento do número dos vazios necessários para esse processo de transferência de calor. Os níveis de temperatura assim como a composição e estrutura do solo influenciam na contribuição de cada possível mecanismo de transferência de calor. De acordo com De Vries (1958), os estudos teóricos da transferência de calor em solos geralmente consideram o solo como sendo homogêneo, e assumem que toda a transferência de calor ocorre uniformemente através do meio poroso.

## **2.5 APROVEITAMENTO DA ENERGIA GEOTÉRMICA**

O aproveitamento da energia geotérmica logo abaixo da superfície do solo é baseado na capacidade que a área escolhida tem de armazenar e trocar calor com o meio externo através de trocadores de calor compostos de mangueiras ou serpentinas com fluido circulante. Um projeto incorreto da instalação dos trocadores (diâmetro e comprimento, tipo de material, tipo do trocador e velocidade do fluido) causam prejuízos ao funcionamento e desempenho do mesmo. Para um projeto de aproveitamento geotérmico é necessário que se tenha em mãos os

parâmetros físicos do solo que dependem do tipo, da proporção e do tamanho das partículas constituintes e da umidade, para que seja possível definir o potencial energético disponível. A melhor forma de determinação do fluxo de calor no solo tem sido pesquisada através de vários métodos no decorrer dos anos. A medição pode ser feita diretamente utilizando sensores de fluxo de calor e medidores de temperatura para estimar o calor armazenado e disponível. Os métodos tradicionais de medição como Stull (2012) e Malek (1993), entre outros, também são ainda bastante utilizados para a determinação do fluxo de calor vindo do subsolo. Mayocchi e Bristow (1995), afirmam que o fluxo de calor no solo é frequentemente medido de forma incorreta e que erros são introduzidos nos cálculos do balanço de energia, especialmente para regiões semiáridas onde o papel do fluxo de calor no subsolo é importante, conforme Heusinkveld et al. (2004). O método mais realista de medição das características térmicas efetivas do solo que pode ser feita em laboratório ou no local é chamado de Teste de Resposta Térmica (TRT), sendo o mais confiável e o único recomendado para instalações de grande ou médio porte em geotermia superficial. O teste TRT se baseia na injeção ou extração de uma quantidade conhecida de energia constante aplicado em diversos modelos de trocador geotérmico durante um tempo suficientemente longo. O método de interpretação dos dados do TRT é baseado em técnicas de regressão e no cálculo das propriedades térmicas em diferentes modelos para cada ciclo fechado e condições de teste. Contudo, este é um método complexo e caro conforme, Tinti et al. (2015), tornando a realização do TRT impraticável para realizar levantamentos calorimétricos na maioria das instalações geotérmicas superficiais pequenas ou domésticas. Nestes casos recorre-se ao uso de tabelas. Isso implica numa abordagem para se determinar a composição, o teor de água e a compactação do solo na profundidade ao qual os coletores estão enterrados, onde a probabilidade de cometer erros poderia ser alta.

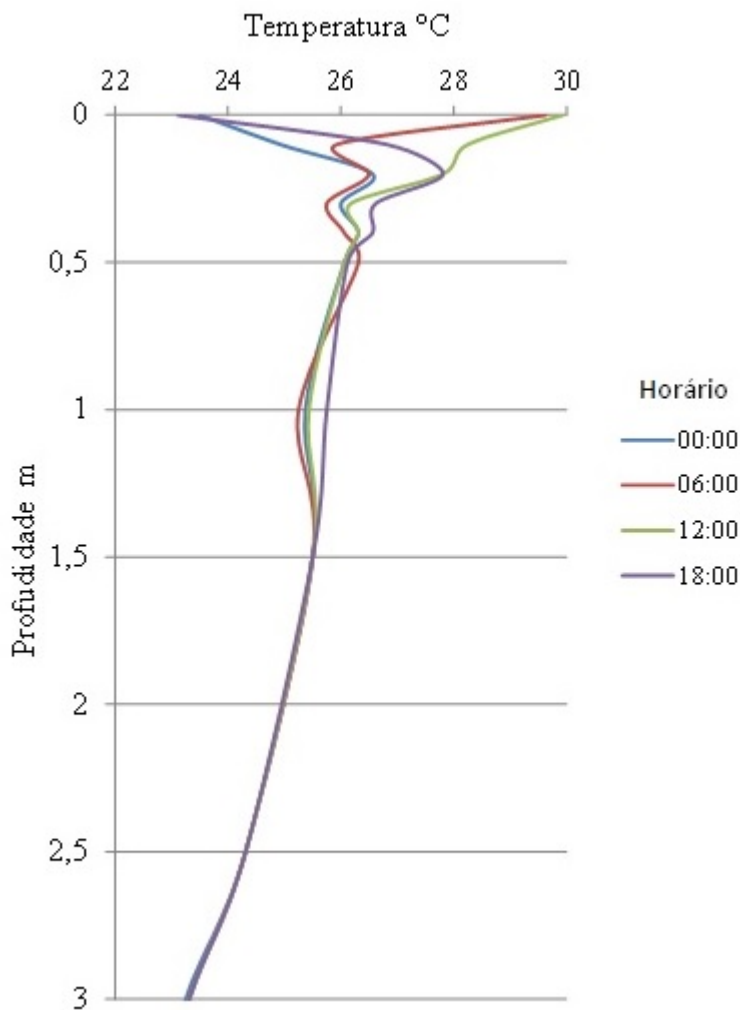
A oscilação da temperatura do solo próximo à superfície, do ponto de vista da teoria da condução de calor, tem sido discutida há décadas em vários textos que tratam da transferência de calor no solo, conforme Carslaw e Jaeger (1960); Sepaskhah e Boersma (1979), Yuan et al. (2008). A Figura 3 é um exemplo da variação de temperatura que ocorre no solo em função da profundidade no período de um dia, medidos no Campus da UFSM em Santa Maria - RS no dia 14/01/2018. Percebe-se que a variação diária de temperatura na camada superficial do solo, ocorre até um metro de profundidade sendo que as variações mais bruscas ocorrem em profundidades inferiores a 50 centímetros.

A observação da temperatura do solo em várias profundidades já vem ocorrendo a algumas décadas, como relatado por Carson (1963); Penrod, Walton e Terrell (1958). O solo atua como uma grande massa termicamente estável, cuja temperatura varia pouco durante o

ano. Pela lentidão da movimentação da temperatura no solo haverá uma temperatura média estável significando que nos meses de verão o solo será mais frio do que a temperatura do ar da superfície, de modo que o calor possa ser rejeitado para o solo.

Por outro lado, no inverno, o solo estará mais quente do que a temperatura do ar da superfície e pode ser usado como fonte de calor.

Figura 3 – Variações térmicas do solo em diferentes horários de um mesmo dia (14/01/2018) Santa Maria – RS



Fonte: Longo (2018).

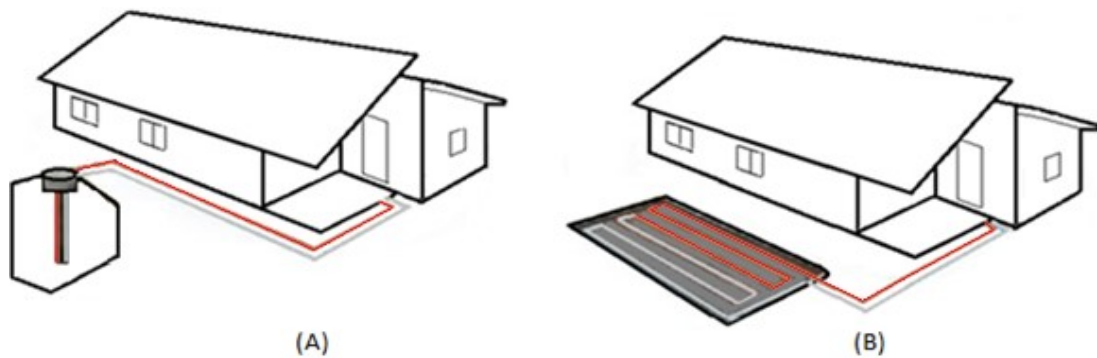
O aproveitamento da energia geotérmica superficial pode variar conforme as temperaturas de exploração, ou seja, em função das necessidades energéticas das estruturas e infraestruturas a climatizar. Nos casos em que as temperaturas de operação do sistema estão na mesma faixa de temperatura do solo pode-se fazer uso diretamente de um sistema de

climatização. Quando as diferenças de temperatura da operação estiverem fora da faixa de temperatura do solo é necessário utilizar bombas de calor do tipo GSHP.

### 2.5.1 Sistemas fechados

Nos sistemas fechados de trocas de calor não existe contato entre o fluido de transporte da energia térmica e o solo/rocha, não havendo por isso troca de matéria, como ocorre no sistema aberto, onde os custos de instalação são geralmente inferiores aos requeridos para a implantação de um sistema fechado, conforme afirma Rafferty (2003). Além disso, apresentam um maior espectro de aplicabilidade em virtude de não estarem dependentes da quantidade da água subterrânea disponível. Assim, é possível afirmar que existe em teoria a possibilidade de aplicação global do condicionamento geotérmico. Os sistemas convencionais fechados podem apresentar diferentes configurações no que concerne às instalações mais profundas que podem ser inseridos em furos verticais (Borehole Heat Exchanger - BHE) ou valas. Os primeiros são conhecidos como sistemas de extração vertical (Figura 4 A) e os segundos, horizontal (Figura 4 B).

Figura 4 – Sistemas fechados (A) vertical e (B) horizontal com GSHP



Fonte: Elaborada pelo Autor (2016).

Segundo Self et al. (2013), os trocadores que utilizam extração horizontal apresentam maior facilidade de instalação que os verticais, contudo necessitam geralmente de maiores áreas para a sua implementação. A instalação da tubulação horizontal é realizada segundo três configurações distintas, que são as configurações simples, em paralelo e em série.

O funcionamento do solo como reservatório de energia térmica é também possível nos sistemas fechados, não existindo retirada ou injeção de água subterrânea. Segundo Lee

(2013), o calor ao ser extraído durante a estação fria provoca uma diminuição da temperatura do solo. Na estação quente, o solo funcionará como reservatório de frio. O calor captado pelo sistema secundário é levado até ao subsolo pelo sistema primário onde é dissipado. A temperatura do reservatório sofrerá um aumento gradual, estando novamente apto no inverno para fornecer calor. O processo repete-se de forma cíclica, permitindo assim a climatização de ambientes.

Outro conceito associado à energia geotérmica superficial consiste na utilização dos solos, águas, rochas e cavidades subterrâneas para armazenamento de energia térmica. Estes sistemas tiveram os seus primeiros desenvolvimentos nos anos 70 do século XX. O seu objetivo principal é a conservação da energia térmica proveniente de diversas fontes, possibilitando uma maior eficiência térmica (LEE, 2013). É possível acumular energia térmica no solo proveniente do calor natural existente no ar ou em massas de água superficiais em processos mecânicos utilizados na indústria onde exista geração de calor ou de sistemas combinados. Segundo o mesmo autor, o calor solar armazenado no verão pode ser utilizado no inverno para aquecimento. De forma análoga, no verão o solo apresentará temperaturas mais reduzidas devido à extração de calor realizada no inverno. Tal fato resultará num aumento do gradiente térmico entre os permutadores de calor e o solo na estação quente, o que resultará numa maior quantidade de energia dissipada.

Existem prédios dos mais diversos modelos, formas, constituições, tamanhos e finalidades. Porém, uma característica que o ambiente de quase todas as edificações tem em comum é que elas exigem aquecimento ou arrefecimento em diferentes momentos ao longo do ano. É muito difícil encontrar-se locais onde os prédios tenham um balanço energético anual entre a energia total necessária para o aquecimento e a energia total para o arrefecimento. Dependendo do local, é necessário mais energia para resfriamento ao longo de um ciclo anual do que para o aquecimento e em outros, exatamente o contrário.

Os métodos tradicionais de aquecimento dependem frequentemente da queima de combustíveis fósseis de forma direta usando óleo ou gás gerado indiretamente para produção de eletricidade. Os sistemas tradicionais de resfriamento são usualmente baseados em equipamentos elétricos de condicionamento de ar, transferindo o calor interno do prédio para a atmosfera local. Os sistemas tradicionais de aquecimento e refrigeração utilizam uma grande quantidade de energia e geram quantidades significativas de emissões de dióxido de carbono. Estima-se que a energia utilizada em edifícios resulte em cerca de metade das emissões de dióxido de carbono no Reino Unido, conforme DTI (2006).

A diminuição do uso de energia gerada por combustíveis para climatização em edificações resultará em significativos benefícios ambientais e econômicos. Na Europa, a Diretiva sobre Desempenho Energético dos Edifícios (The European Parliament, 2003) e as orientações nacionais resultantes da *Office of the Deputy Prime Minister*, publicadas em 26 de janeiro de 2006 pela *House of Commons London: Annual Report and Accounts 2005 for 2006 (ODPM, 2006)*, que estabelecem os requisitos para o planejamento de edifícios novos e remodelados para assegurar que sejam adotadas medidas adequadas para conservação de energia e que fontes alternativas de energia sejam consideradas. Uma ampla gama de tecnologias de baixo teor de carbono (LZC) está disponível para fornecer parte ou toda a energia para edifícios conforme Thorne (2006). A energia geotérmica superficial representa um subconjunto dessas tecnologias, que ao interagir com o recurso térmico do solo logo abaixo da superfície ou ao redor de uma edificação pode permitir reduções significativas no uso de energia fóssil.

Teoricamente, os arranjos geotérmicos superficiais são relativamente simples utilizando trocadores de calor enterrados no solo através de furos ou horizontalmente para que seja possível a realização das trocas térmicas com o subsolo. Logo abaixo da superfície do solo em uma profundidade ainda rasa, a variação da temperatura é pequena durante todo o ano. Pode-se assim considerar que o solo atua como uma grande massa termicamente estável, cuja temperatura varia pouco durante o ano. Com o aumento da profundidade, a temperatura do solo tende a se tornar estável e igual à temperatura média da superfície do local onde se realizou a medição. Uma temperatura estável do solo significa que nos meses de verão o solo será mais frio do que a temperatura do ar da superfície e o calor pode ser rejeitado para o solo. Inversamente, no inverno o solo estará mais quente do que a temperatura do ar da superfície e pode ser usado como fonte de calor.

## 2.6 DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR NO SOLO

Na prática, uma medição precisa e variável do fluxo de calor no solo é uma tarefa difícil. Existem sensores do tipo placa que podem ser usados para fazer medições diretas do fluxo de calor do solo, porém necessitam ser colocados em profundidades onde não ocorram perturbações térmicas de outra natureza. O movimento relativamente rápido da água (tanto na forma líquida como na de vapor) perto da superfície do solo afeta a precisão das medições pelos discos de fluxo de calor devidos ao mau contato térmico entre as placas e o solo como explica, Kimball et al. (1976). Vários outros métodos foram desenvolvidos para medir o fluxo



de calor no solo, por exemplo, Jackson (1958); Lettau (1971); Kimball et al. (1976); Malek (1993).

Com o objetivo de associar o fluxo de calor do solo à temperatura da superfície Menenti (1984) propôs que esse fluxo pode ser expresso como uma função linear da temperatura superficial semelhante à relação entre a tensão e a corrente elétrica. Porém, a ideia do parâmetro denominada por ele como admitância térmica se baseava em algumas suposições restritivas, sendo o procedimento complicado e demorado, difícil de ser usado para fins práticos. Trabalhos como o de Wang e Bras (1999), propõem um método mais simples que utiliza as séries temporais de temperatura da superfície para calcular o fluxo de calor do solo. Este modelo mostrou-se menos restritivo do que os algoritmos existentes. Finalmente, um artigo publicado por Moradi et al. (2016), da Colorado School of Mines demonstraram a importância de se incluir a convecção e o calor latente na modelagem de sistemas que retiram ou armazenam energia térmica no solo através de aberturas no mesmo. Os seus resultados também revelaram a necessidade de se usar a condutividade térmica efetiva dependente da saturação na modelagem em solos não saturados, em vez de usar valores constantes que são obtidos a partir dos testes de resposta térmica. Demonstrou também que a negligência do armazenamento de calor e/ou dos processos de calor latente no solo podem causar grandes erros na determinação do fluxo de calor superficial e que isso pode levar a erros substanciais nos cálculos do balanço energético.

## 2.7 RESUMO DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo foram feitas revisões sobre o comportamento térmico superficial do solo. Na seção 2.1 é enfatizada a importância do conhecimento do comportamento do fluxo de calor no solo para atividades ligadas à geotécnica, principalmente quando se trata do transporte de fluido aquecido em tubulações subterrâneas. Observa-se que existem várias classificações para a energia térmica disponível na superfície do solo, algumas levando em consideração a profundidade e outras, as faixas de temperatura. Na seção 2.2 ficou demonstrado que o fluxo de calor no solo depende da absorção da energia solar e que ocorre um ciclo diário e outro anual de oscilação de temperatura. Existe também uma defasagem no tempo nessa oscilação conforme aumenta a profundidade.

Neste capítulo consta que os métodos tradicionais frequentemente medem o fluxo de calor de forma incorreta, introduzindo erros nos cálculos do balanço de energia. A forma mais

realista de se estabelecer as características térmicas do solo é feita em laboratório através do Teste de Resposta Térmica. Porém este teste só é viável para empreendimentos de grande e médio porte devido a sua complexidade e custo. Portanto, ele é impraticável para a grande maioria de instalações geotérmicas superficiais pequenas ou domésticas. Na seção 2.3 que trata da contribuição que a água exerce no comportamento térmico dos solos, mostrando-se que as propriedades físicas do espaço poroso, tais como, porosidade, interconexão entre os poros e a permeabilidade, influenciam no transporte de fluidos no solo e, conseqüentemente, nas suas propriedades térmicas. Aborda-se também a classificação do solo quanto à exploração da energia geotérmica superficial e aos tipos de trocadores, que podem ser do tipo vertical ou horizontal.

### 3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECIMENTO DO SOLO

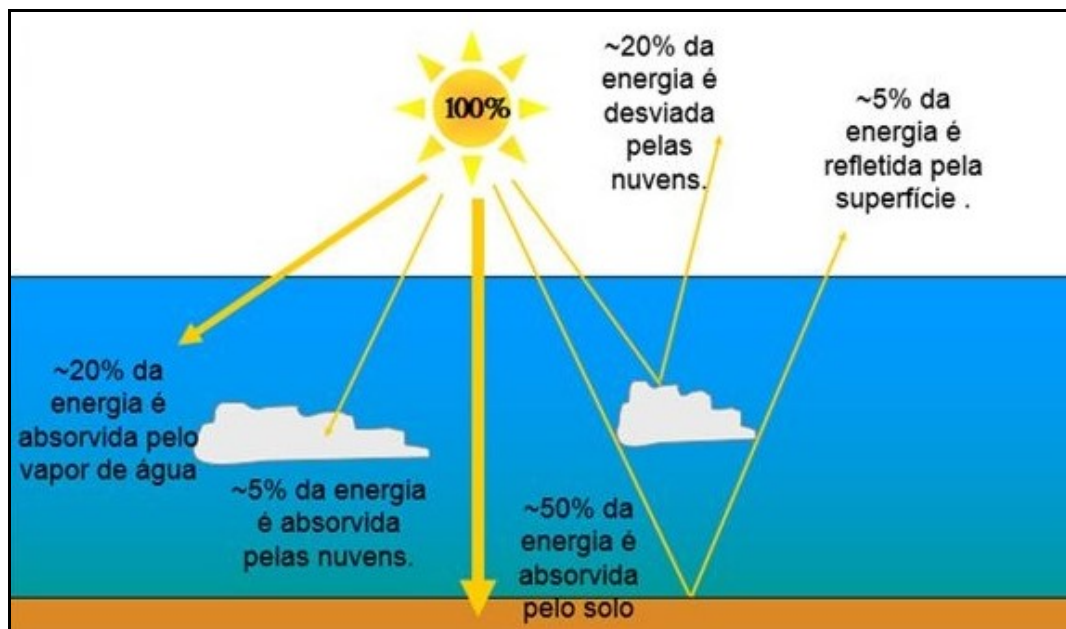
#### 3.1 INTRODUÇÃO

As propriedades térmicas do solo resultam de um conjunto de fatores nos quais se incluem a sua textura e sua composição química, entre outros. No aproveitamento geotérmico é de grande importância o conhecimento de características, tais como difusividade e a condutividade térmica. Neste capítulo são demonstrados os referenciais teóricos que regem a distribuição do fluxo de calor no solo.

#### 3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO SOLO

A radiação solar que incide na superfície da terra é parcialmente absorvida pelo solo através do aquecimento do mesmo, conforme mostra a Figura 5. Este aumento da temperatura dá origem a um fluxo de calor entre a superfície e o interior do solo.

Figura 5 – Balanço energético do sistema sol-terra



Fonte Adaptado de Hewitt e Jackson (2009).

Durante o dia a temperatura na superfície é maior do que nas camadas logo abaixo e ocorre a transferência de energia da superfície para o interior do solo. Durante a noite ou dias frios, o fluxo de calor é inverso.

Os solos podem apresentar comportamento térmico distinto devido a alterações nos parâmetros hidrogeológicos do meio. Brandl (2006) ressalta a importância do estudo das variações do nível freático bem como dos parâmetros que definem o fluxo da água subterrânea. Para Rees et al. (2000), a existência de um fluxo subterrâneo cuja importância seja considerável pode dissipar o calor injetado no subsolo. A eficiência dos trocadores de calor é função dos parâmetros geológicos e hidrogeológicos do local.

### 3.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Quando se estuda a transferência de calor é importante definir algumas variáveis referentes aos mecanismos. A quantidade total de energia térmica transferida durante a atuação de um determinado processo é representada por  $Q$  e quantificada em joules (J). O seu valor pode ser determinado por:

$$Q = \int_0^s \dot{Q} dt \quad (3.1)$$

onde:

$\dot{Q}$  é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo, ou taxa de transferência de calor expressa em watts

$s$  é o intervalo de tempo para o qual ocorre a transferência de energia térmica.

No caso em que  $\dot{Q}$  se mantém constante durante todo o período de atuação de um dado mecanismo de tempo de transferência  $\Delta t$ , a equação (3.1) pode ser reescrita como:

$$\Delta Q = \dot{Q} \Delta t \quad (3.2)$$

A taxa de transferência de calor por unidade de área normal à direção segundo a qual se dá a propagação de energia térmica representada por  $\dot{q}$  e expressa em unidades SI por  $W \cdot m^{-2}$ , chamado de fluxo de calor. Este é dado pelo quociente entre a quantidade de calor transferido por unidade de tempo e a área da seção perpendicular à direção de fluxo  $A$  ( $m^2$ )

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.3)$$

### 3.3.1 Capacidade térmica volumétrica

A capacidade térmica volumétrica  $C_v$ , expressa em  $Jm^{-3}C^{-1}$  pode ser definida como a quantidade de energia necessária para elevar em um grau Celsius um metro cúbico de material. Segundo Dickinson et al. (2009) existe armazenamento de energia térmica tanto na fração sólida como na líquida, logo a capacidade térmica volumétrica depende das propriedades térmicas de ambas. Segundo Hillel (1998), a contribuição da fração gasosa pode ser desprezada por apresentar um valor extremamente baixo.

A capacidade térmica volumétrica também corresponde ao quociente entre a condutividade e difusividade térmica, como apresentado na equação

$$C_v = \frac{k}{D} \quad (3.4)$$

Como o solo é um elemento composto basicamente por minerais, matéria orgânica, água e gases, a capacidade térmica volumétrica ( $c_v$ ) 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 (2002), o calor específico volumétrico pode ser expresso pela relação:

$$c_{v\ solo} = (c_m f_m) + (c_o f_o) + (c_a f_a) + (c_g f_g) \quad (3.1)$$

onde:

$c_{v\ solo}$ : capacidade t volumétrica do solo ( $Jm^{-3}C^{-1}$ );

$c_m$ : calor específico mássico de minerais ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ );

$f_m$ : fração volumétrica de minerais;

$c_o$ : calor específico mássico de matéria orgânica ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ );

$f_o$ : fração volumétrica de matéria orgânica;

$c_a$ : calor específico mássico da água ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ );

$f_a$ : fração volumétrica variável da água;

$c_g$ : calor específico mássico do ar ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ );

$f_g$ : fração volumétrica variável do ar.

A Tabela 4 apresenta os valores térmicos típicos dos elementos que constituem o solo, segundo Prevedello (1996).

Tabela 4 – Condutividade térmica, capacidade térmica e difusividade térmica para diferentes tipos de solo

Tipo de Rocha	Condutividade Term. (W/mK)			Capacidade Térm. Vol (MJ/m <sup>3</sup> K)	Difusividade Térmica (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)		
	Min.	Típico	Max.		Min.	Típico	Máx.
Basalto	1,3	1,7	2,30	2,6	0,50	0,65	0,88
Granito	2,1	3,4	4,10	3,0	0,70	1,13	1,37
Calcário	2,5	2,8	4,00	2,4	1,04	1,17	1,67
Arenito	1,3	2,3	5,10	2,8	0,46	0,82	1,82
Areia seca	0,3	0,4	0,55	1,6	0,19	0,25	0,34
Areia saturada	1,7	2,4	5,00	2,9	0,59	0,83	1,73
Areia/silt seca	0,4	0,5	1,00	1,6	0,25	0,31	0,62
Areia/silt satur.	0,9	1,7	2,30	3,4	0,26	0,50	0,68

Fonte Prevedello (1996).

### 3.3.2 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 em função do gradiente de temperatura existente na direção do fluxo. A condutividade térmica do solo pode então ser expressa pela lei da condução térmica, também conhecida como Lei de Fourier, que diz que o fluxo de calor é a quantidade de energia que flui através de uma unidade de área por unidade de tempo.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -k \phi \nabla \rightarrow T dA \quad (3.2)$$

Fazendo a integração para materiais de geometria unidimensional tem-se:

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

onde:

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

$A$ : área da seção transversal ( $m^2$ );

$\Delta T$ : gradiente de temperatura ( $K$  ou  $^{\circ}C$ );

$\ell$ : distância percorrida ( $m$ );

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

### 3.3.3 Resistividade térmica

A resistividade térmica ( $r$ ) do solo expressa em  $m °C W^{-1}$  é definida como uma medida da resistência à passagem de energia térmica. Segundo Singh e Devid (2000), ela corresponde ao inverso da condutividade, definindo-se como:

$$r = \frac{1}{k} \quad (3.4)$$

Esta é uma propriedade que depende das grandezas básicas do solo tal como acontece com a condutividade térmica. Ainda Segundo Singh e Devid (2000), os solos exibem maior resistividade térmica quando secos em virtude do ar que preenche os poros apresentar maior resistividade comparativamente à água. Sob o ponto de vista mineralógico, verifica-se que os solos mais ricos em minerais de quartzo, como as areias, apresentam menores resistividades térmicas. Os minerais de argila e a matéria orgânica apresentam elevada resistividade térmica. Assim nos solos onde a presença desses minerais é maior, a resistividade será maior também.

### 3.3.4 Capacidade térmica

A capacidade térmica, expressa em ( $J °C^{-1}$ ), define-se como a quantidade de energia térmica que é necessário fornecer a uma dada substância para provocar um aumento na sua temperatura de 1 °C e pode ser expressa através da equação (3.5)

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (3.5)$$

em que  $Q$  é o calor transferido em J, e  $\Delta T$  é a variação de temperatura em °C.

A capacidade térmica dos solos é influenciada pela sua composição mineralógica, teor em matéria orgânica e teor em água, sendo o último o mais preponderante Wierenga (1969) apud Abud-Hamdeh (2003).

### 3.3.5 Calor específico ou capacidade térmica mássica

O calor específico expresso em  $Jkg^{-1}C^{-1}$ , constitui um importante parâmetro a se determinar quando são realizados estudos em regime variável. O calor específico define-se como a quantidade de energia armazenada num material por unidade de variação de temperatura e massa conforme Brandl, (2006). Banks (2012) define-o como uma medida da capacidade que os solos apresentam para armazenar calor. O calor específico é obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad (3.6)$$

onde  $m$  é a massa em kg.

Reescrevendo a equação (3.5) em ordem e substituindo em (3.6) obtém-se:

$$c = C/m \quad (3.7)$$

Com isto se conclui que o calor específico pode ser descrito como a capacidade térmica por unidade de massa.

### 3.3.6 Difusividade térmica do solo

A difusividade térmica do solo é definida por Çengel (2009) como sendo o quociente do calor conduzido pelo calor armazenado, ou seja, o quociente entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica. Portanto, a expressão que define a difusividade térmica ( $D$ ) do solo é dada por:

$$D = \frac{k}{C_v} = \frac{k}{\rho c} \quad (3.7)$$

onde:

$D$ : difusividade térmica ( $m^2 s^{-1}$ );

$k$ : condutividade térmica ( $Wm^{-1}C^{-1}$ );

$C_v$ : capacidade volumétrica do solo ( $kJm^{-3}K^{-1}$ ).



$C$ : capacidade térmica por unidade de massa do material ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ )

$\rho$ : densidade do material ( $kgm^{-3}$ )

A difusividade térmica do solo é um dos principais parâmetros de transporte de calor que afeta a densidade do fluxo de calor e a distribuição de temperatura no solo, conforme Santos (1987). A difusividade térmica é uma propriedade que fornece a velocidade de avanço da frente de aquecimento do solo, parâmetro que relaciona a capacidade de condução (condutividade térmica) e o armazenamento de calor (capacidade térmica volumétrica), segundo Schoeffel e Mendes (2005).

Na literatura técnica existem alguns métodos que permitem estimar a difusividade térmica do solo. De Vries (1963) propôs um modelo teórico baseado nas frações volumétricas dos constituintes do solo e de suas formas. Por ser um método que leva em consideração os fatores de forma do solo e ser de difícil estimativa, este método aplica-se melhor aos solos com estrutura simples. A estrutura de um solo é a sua característica física expressa pela forma, dimensão e arranjo das suas partículas sólidas e dos vazios que a elas se associam. Os métodos para estimar a difusividade térmica em solos não uniformes têm sua teoria baseada na transferência de calor e foram desenvolvidos por Lettau (1971). Estes métodos descrevem a difusividade térmica como uma função da profundidade.

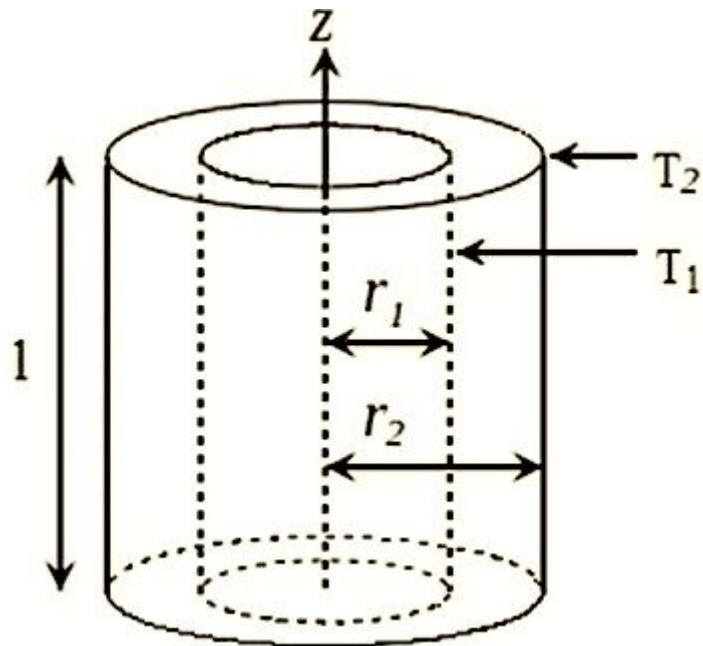
Considerando que a condução é o mecanismo primário responsável pela transferência de calor no solo, o estudo da difusividade térmica pode ser realizado com base nesta característica. Sendo assim, a difusividade térmica pode ser estimada por meio de observações das temperaturas máximas e mínimas diárias em duas ou mais profundidades do perfil do solo conforme afirma Santos (1987).

### 3.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO EM TUBOS

A determinação da capacidade de transferência de calor através de um cilindro vazado é dada pela diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa, como mostrado na Figura 6. Esse processo de transferência de temperatura ocorre por condução. De acordo com Çengel (2009), o fluxo de calor que atravessa a parede cilíndrica pode ser obtido através da equação de Fourier, ou seja:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (3.8)$$

Figura 6 – Transferência de calor por condução em tubos



Fonte: Çengel (2009, p. 97).

A área de formas cilíndricas é função do seu raio e comprimento:

$$A = 2\pi rL \quad (3.9)$$

Separando as variáveis e integrando entre \$T\_1\$ em \$r\_1\$ e \$T\_2\$ em \$r\_2\$, vem:

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{Q} \frac{dr}{r} = - \int_{T_1}^{T_2} k2\pi LdT$$

$$\dot{Q} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -k2\pi L \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{Q} \times (\ln r|_{r_1}^{r_2}) = -k2\pi L (T|_{T_1}^{T_2})$$

$$\dot{Q} \times [\ln r_2 - \ln r_1] = -k2\pi L(T_2 - T_1) \quad (3.10)$$

Aplicando-se as propriedades dos logaritmos, tem-se que:

$$\dot{Q} \left[ \ln \frac{r_2}{r_1} \right] = k2\pi L(T_2 - T_1)$$

Dessa forma, o fluxo de calor através de uma parede cilíndrica é dado por:

$$\dot{Q} = \frac{k2\pi L}{\left[ \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} (T_2 - T_1) \quad (3.11)$$

onde:

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

$k$ : condutividade térmica do material ( $Wm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ );

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

$L$ : comprimento do tubo ( $m$ );

$r_1$ : raio interno do cilindro ( $m$ );

$r_2$ : raio externo do cilindro ( $m$ );

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

$T_0$ : temperatura externa do cilindro ( $^\circ C$ ).

### 3.4.1 Determinação da resistência térmica na parede cilíndrica

Pode-se adotar o conceito de resistência térmica dos materiais também para a parede cilíndrica, Çengel (2009). Fazendo-se uma analogia com um fluxo de corrente elétrica, um fluxo de calor na parede cilíndrica também pode ser representado como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.12)$$

onde:

$\Delta T$ : potencial térmico;

$R$ : resistência térmica da parede;

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

Assim para uma parede cilíndrica, obtém-se:

$$\dot{Q} = \frac{k2\pi L}{\left[ \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.13)$$

Logo, a resistência térmica da parede do cilindro será:

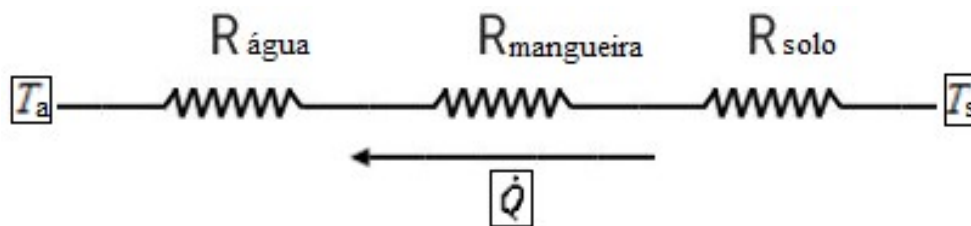
$$R = \frac{\ln\left[\frac{r_2}{r_1}\right]}{k2\pi L} \quad (3.14)$$

### 3.4.2 Transferência de calor combinado em sistemas radiais

A troca de calor com o subsolo utilizando uma tubulação cilíndrica envolve duas resistências, uma por condução (no solo e na parede da mangueira) e outra por convecção na água, sendo ambas ligadas em série. A resistência térmica total é dada pela soma destas resistências. A figura 7 representa esta analogia.

$$R_{total} = R_{\text{água}} + R_{\text{mangueira}} + R_{\text{solo}} \quad (3.15)$$

Figura 7 – Esquema elétrico equivalente para a troca de calor geotérmica



Fonte: De Nardin (2015).

Ainda segundo Çengel (2009), a partir da resistência dada pela equação (3.8), a taxa de transferência de calor no subsolo será expressa por:

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_s}{R_{total}} \quad (3.16)$$

onde:

$T_a$ : temperatura da água (°C);

$T_s$ : temperatura do solo (°C).

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

$$R = \frac{1}{Sk} \quad (3.17)$$

onde:

$S$ : fator de forma de condução ( $m$ );

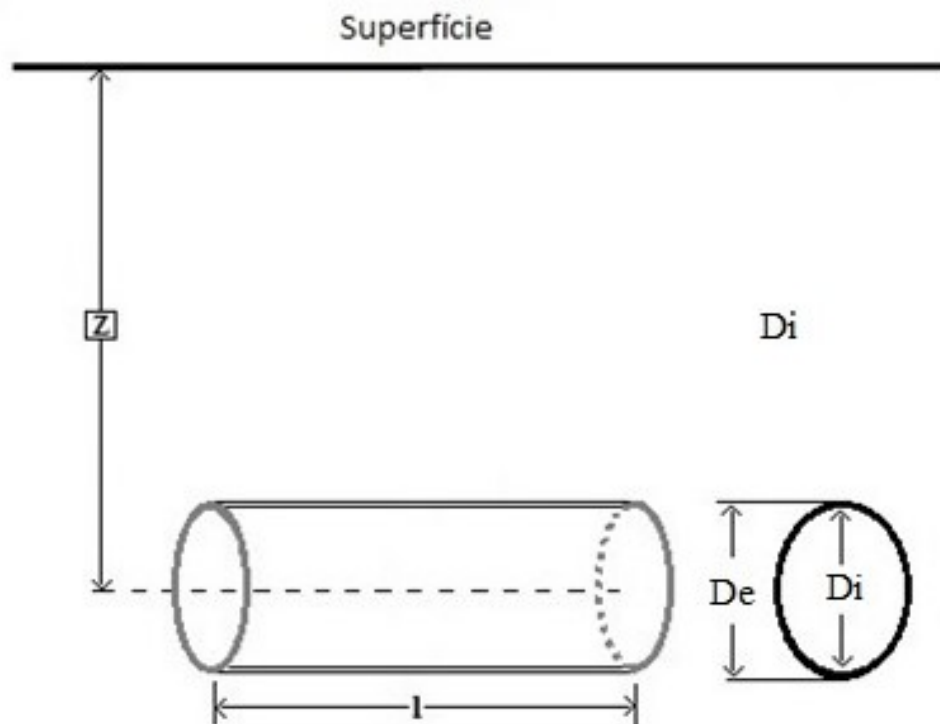
$k$ : condutividade térmica do meio ( $Wm^{-1}C^{-1}$ ).

Para determinar o fator de forma apresentado na equação (3.14), 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 para o ambiente. 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  $D_e$  enterrado em um meio semi-infinito com profundidade  $z$ , onde  $L \gg D_e$  e  $z > 1,5D_i$ , como mostra a Figura 8. Çengel (2009) usa o fator de forma e a resistência térmica os quais são expressos pelas seguintes equações:

$$S_{solo} = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{4z}{D_e}\right)} \quad (3.18)$$

$$R_{solo} = \frac{\ln\left(\frac{4z}{D_e}\right)}{2\pi k_{solo} L} \quad (3.19)$$

Figura 8 – Transferência de calor por condução em tubo enterrado na profundidade  $Z$



Para determinar o fator de forma e a resistência térmica de uma parede deve-se considerar o diâmetro interno  $D_i$  e o externo  $D_e$  da parede da mangueira, conforme ilustrado na Figura 8. De acordo com Çengel (2009), o fator de forma e a resistência térmica são obtidos respectivamente através das seguintes expressões:

$$S_{parede} = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)} \quad (3.20)$$

$$R_{parede} = \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi kL} \quad (3.21)$$

Para determinar a resistência do fluido, a troca de calor é feita por convecção. Neste caso, na troca por circulação do fluido dentro de um cilindro há um conjunto de equações para descrevê-la, conforme Dutra (2010).

A resistência térmica do fluido é calculada pela seguinte expressão:

$$R_{fluido} = \frac{1}{hA} \quad (3.22)$$

$$R_{fluido} = \frac{1}{h\pi DL} \quad (3.23)$$

onde:

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

$D$ : 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 por:

$$h = \frac{kN_u}{D_i} \quad (3.24)$$

$$N_u = 0,023R_e^{0,8}P_r^n \quad (3.25)$$

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (3.26)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.27)$$

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;

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

$V$ : velocidade de deslocamento do fluido ( $ms^{-1}$ );

$D$ : é o diâmetro interno do tubo ( $m$ );

$\mu$ : viscosidade dinâmica ( $kgm^{-1}s^{-1}$ );

$\rho$ : densidade do fluido ( $kgm^{-3}$ ).

Pode-se obter a troca de calor no subsolo usando:

$$R_{total} = \frac{1}{(\pi D_e L) \frac{k_{fluido} Nu}{D_i}} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi L K_{parede}} + \frac{\ln\left(\frac{4z}{D_e}\right)}{2\pi k_{solo} L} \quad (3.28)$$

O fluxo de calor é dado por:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (3.29)$$

### 3.5 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE APARENTE DO SOLO

A equação que descreve a transferência de calor condutivo unidimensional em um meio isotrópico é:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.31)$$

onde:

T: temperatura

t: tempo

z: profundidade

C: a capacidade volumétrica de calor

K: condutividade térmica aparente.

Considerando que  $C_s$  e  $K$  são independentes do tempo, ou seja, que o solo é verticalmente homogêneo em relação às suas propriedades térmicas, a Equação 3.31 torna-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.32)$$

onde  $D = \frac{K}{C_s}$  é a difusividade aparente do solo.

As propriedades térmicas do solo, principalmente a difusividade térmica, são utilizadas em pesquisas para simulação da temperatura do solo em diferentes profundidades. A simulação para estimativa da temperatura do solo possibilita conhecer a temperatura do solo ao longo do tempo e da profundidade. Também, possibilita que sejam feitas estimativas para profundidades intermediárias ou para dados que faltarem quando não for possível a medida instrumental. Ainda existe a possibilidade de se usar um modelo de simulação da temperatura do solo que pode auxiliar quando houver alterações na temperatura do solo em diferentes situações. Muitas vezes a obtenção dos dados gera dificuldades, pois envolvem tempo, logística e requerem custos elevados. Ter um bom modelo de simulação da temperatura do solo que se aproxime do real torna-se importante e útil em estimar e prever a distribuição de temperatura.

### 3.5.1 Método da Amplitude Direta (AMP1)

Se for assumido que os valores das propriedades térmicas não variam em função da profundidade, do tempo e da temperatura em todo o solo e, estabelecendo as condições de contorno  $T(0, t) = T_\infty + T_0(t) \sin(wt)$  e  $T(z \rightarrow \infty, t) = T_\infty$ , a solução fisicamente relevante da Eq. (3.25) demonstrada inicialmente por Jackson e Kirkham (1958), torna-se definida da seguinte forma:

$$T(z, t) = T_\infty + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{z}{d_n}} \left( a_n \cos \left( wnt - \frac{z}{d_n} \right) + b_n \sin \left( wnt - \frac{z}{d_n} \right) \right) \quad (3.33)$$



onde  $a_n$  e  $b_n$  são coeficientes de Fourier definidos por

$$a_n = \frac{2}{p} \int_0^P T_0(t) \cos(wnt) dt \quad (3.34)$$

$$b_n = \frac{2}{p} \int_0^P T_0(t) \sin(wnt) dt \quad (3.35)$$

Considerando apenas a primeira harmônica da flutuação da temperatura diária chegam-se as condições de contorno.

$$T(0, t) = T_\infty + T_0 \text{sen}(wt) \quad (3.36)$$

$$T(z \rightarrow \infty, t) = T_\infty \quad (3.37)$$

onde:

$T_\infty$ : temperatura média do solo;

$T_0$ : amplitude do intervalo de medição;

$w = \frac{2\pi}{24h}$  é a frequência fundamental da onda de temperatura da superfície.

Considerando constantes as propriedades térmicas do solo em relação à profundidade e ao tempo, apenas o primeiro harmônico da Eq. (3.28) deve ser considerado para se obter as medidas de temperatura estabelecidas por:

$$T(z, t) = T_\infty + T_0 e^{-z \cdot \sqrt{\frac{w}{2D}}} \cdot \text{sen} \left( wt - z \cdot \sqrt{\frac{w}{2D}} \right) \quad (3.38)$$

do solo nas duas profundidades  $z_1$  e  $z_2$ . A aparente difusividade térmica pode ser resolvida explicitamente da Eq. (3.33) como

$$D_{h,app} = \frac{w}{2} \left( \frac{z_2 - z_1}{\ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right)} \right)^2 \quad (3.39)$$

onde  $A_m$  é a amplitude da onda de temperatura em  $z_m$  para  $m = 1; 2$ .

A Equação 3.34 é referida como o Método de Amplitude Direta (AMP1). Para aplicar a Eq. 3.36 são feitas quatro medições de temperatura. Para isto os valores máximo e mínimo em duas profundidades durante o dia são requeridos. Medições precisas dos tempos das ocorrências não são necessárias.

### 3.5.2 Método do Arcotangente (AMP2)

Após o desenvolvimento de Horton et al. (1983), baseado nas técnicas de regressão chamada mínimos quadrados linear padronizado (standard linear least square regression techniques) desenvolvida por Draper e Smith (1966), estimativas teoricamente mais precisas da difusividade aparente podem ser feitas considerando harmônicas mais altas. A temperatura do solo no limite superior pode ser aproximada por uma Série de Fourier finita, do tipo:

$$T(0, t) = T_{\infty} + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3.40)$$

onde:

$T_{\infty}$ : temperatura média do intervalo de tempo considerado;

$N$ : número de harmônicos;

$a_n$  e  $b_n$  são as amplitudes.

As amplitudes podem ser determinadas pela montagem da Eq. (3.40) para medidas da temperatura do solo usando o Método de Mínimos Quadrados. Considerando os harmônicos até  $N = 2$ , obtém-se:

$$D = \frac{\omega}{2} \left( \frac{z_2 - z_1}{\arctan X} \right)^2 \quad (3.41)$$

onde

$$X = \frac{(T_1 - T_3)(T_2' - T_4') - (T_2 - T_4)(T_1' - T_3')}{(T_1 - T_3)(T_1' - T_3') - (T_2 - T_4)(T_2' - T_4')} \quad (3.42)$$

As temperaturas  $T$  e  $T'$  são registradas a cada 6 h em duas profundidades  $z_1$  e  $z_2$ , respectivamente. A Equação (3.41) é referida como Método do Arcotangente (AMP2).

### 3.5.3 Métodos da Fase Direta (PHA1)

Em analogia com o Método DAM, podem ser equacionadas as fases das ondas de temperatura entre duas profundidades diferentes. Mais uma vez, pode-se resolver explicitamente a Eq. (3.7) para a difusividade térmica aparente fazendo

$$D = \frac{1}{2\omega} \left( \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right)^2 \quad (3.43)$$

onde:

$t_m$  é tempo medido de ocorrência da temperatura máxima ou mínima do solo em cada uma das profundidades  $z_m$ .

Além disso, medidas mais frequentes são necessárias para garantir estimativas precisas de  $t_m$ . Em dias nublados, podem ocorrer vários máximos de  $T$ , tornando difícil a determinação de  $t_m$ .

### 3.5.4 Método do Logaritmo (PHA2)

No Método do Logaritmo (PHA2) pode-se considerar apenas o segundo harmônico, conforme Horton et al. (1983). Usando os mesmos pressupostos da equação 3.40, ou seja, quatro medições de temperatura dos valores máximo e mínimo em duas profundidades durante o dia, a difusividade térmica aparente é explicitamente dada por

$$D = \frac{1}{2\omega} \cdot \left( \frac{z_2 - z_1}{\frac{1}{2\omega} \ln Y} \right)^2 \quad (3.44)$$

$$Y = \frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2} \quad (3.45)$$

As temperaturas  $T$  e  $T'$  são gravados a cada 6 h em duas profundidades  $Z_1$  e  $Z_2$  respectivamente.

### 3.5.5 Método Numérico das Diferenças Finitas (NUM)

A equação 3.32 para solos homogêneos pode ser aproximada por diferenças finitas (Richtmyer e Morton (1994)). A solução para  $D$  é dada por

$$D = \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} \cdot \frac{T(z,t+\Delta t) - T(z,t)}{T(z+\Delta z,t) - 2T(z,t) + T(z-\Delta z,t)} \quad (3.46)$$

onde:

$\Delta t$  é o espaço do tempo entre observações de temperatura

$\Delta z$  é a distância vertical entre dois sensores de temperatura.

O esquema numérico é estável se satisfizer a relação:

$$D \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} < \frac{1}{2} \quad (3.47)$$

Dada uma série temporal de observações de temperatura em várias profundidades. As estimativas da difusividade podem ser calculadas usando o Método Numérico de Diferenças Finitas (NUM) determinadas pela Eq. (3.41).

## 3.6 RESUMO DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo fez-se uma revisão bibliográfica referente às pesquisas do comportamento térmico superficial do solo e dos fenômenos físicos envolvidos, tais como radiação, convecção, condução entre outros. Os trabalhos analisados demonstram como cada solo tem características térmicas locais próprias, pois são muitas as variáveis envolvidas. Também foi abordada a modelagem matemática do aquecimento do solo.

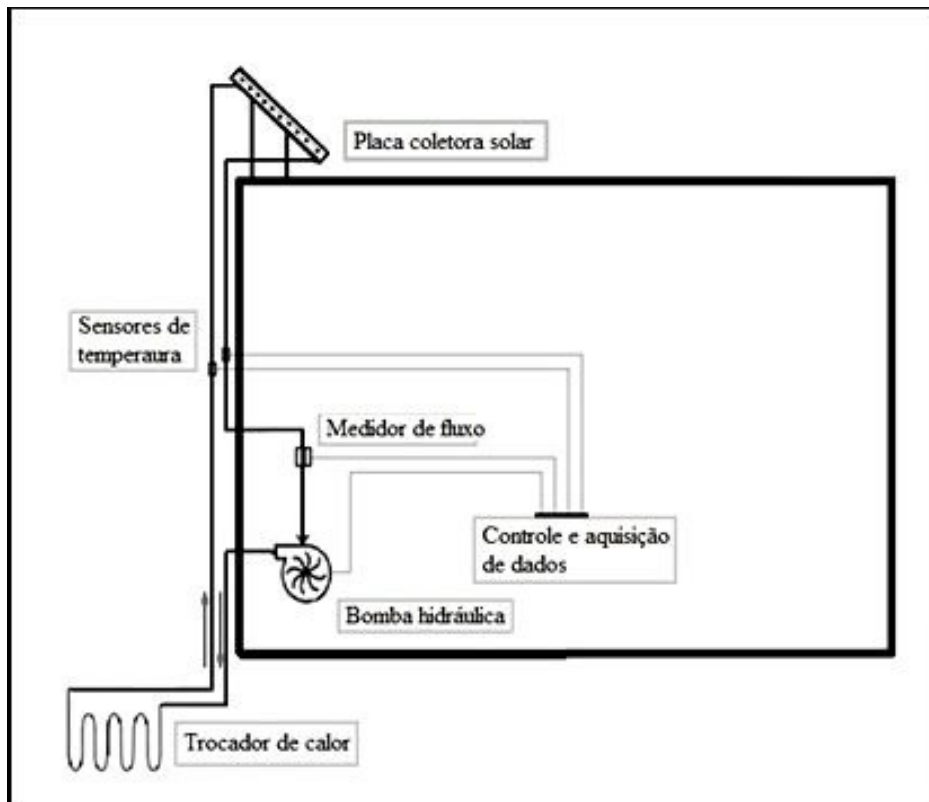
Na seção 3.2 foram apresentadas as equações que definem as principais características térmicas do solo, como capacidade térmica volumétrica, condutividade térmica e difusividade térmica. Na seção 3.3, foram abordadas as equações de transferência de calor em paredes

cilíndricas e as de transferências de calor combinadas em sistemas radiais. A seção 3.4 trata da difusividade aparente do solo e dos métodos matemáticos para calculá-la.

#### 4 TESTES EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento de um trocador geotérmico eficiente para a climatização de ambientes passa pelo dimensionamento e pela distribuição dos tubos que serão enterrados no solo. É necessário que se calcule o comprimento e o diâmetro da tubulação, a velocidade do fluido, a área de solo ocupada e a profundidade em que esta tubulação será instalada. Conforme o capítulo 2, a determinação do fluxo de calor no solo e a sua taxa de transferência são motivos de exaustivas pesquisas. Existe cada vez mais certeza de que vários fatores influenciam as características térmicas do solo e sua modelagem pode ser bastante complexa e na maioria das vezes, imprecisa para necessidades mais específicas. Os experimentos nesta tese são baseados em dados adquiridos experimentalmente por instrumentação eletrônica. A Figura 9 descreve os detalhes de como foi implementado o experimento do trocador geotérmico.

Figura 9 – Diagrama do experimento do trocador geotérmico



Fonte: Elaborada pelo Autor (2016).

O trocador de calor no subsolo ou *ground heat exchanger* (GHX), que foi utilizado nesta pesquisa é formado por uma mangueira polietileno de alta densidade (PEAD) com 25 mm de diâmetro e 100 metros de comprimento e enterrada na profundidade de 5 metros. A mangueira foi disposta na forma de espiral, também denominada “slinky”, com um metro de diâmetro e formando um comprimento total de 15 metros, como mostra a Figura 10, buscando obter a maior área possível de contato do trocador com o solo como indicado por Fujii et al. (2013). A Figura 11 mostra o trocador posicionado na profundidade definida. Os trocadores de calor utilizados foram projetados para fazer parte dos experimentos geotérmicos realizados no sítio experimental do CEESP-UFSM.

Inicialmente foram dimensionados os trocadores de calor no solo baseados nas equações de transferência de calor mostradas anteriormente e usando valores tabelados das características térmicas do solo do local. No entanto, esses valores obtidos pelas equações servem apenas como uma mera referência para o dimensionamento final, visto que a determinação teórica da taxa transferência de calor no solo costuma ser diferente daquelas medidas feitas in loco, devido aos vários fatores que influenciam nesse valor, tais como frio, calor, umidade, pressão, etc.

#### 4.1 TROCADOR DE CALOR GEOTÉRMICO HORIZONTAL

Figura 10 – Montagem do trocador geotérmico



Fonte: CEESP - Centro de Excelência em Energia e Sistema de Potência – UFSM (2014).

Figura 11 – Detalhe da mangueira enterrada a 5 metros de profundidade



Fonte: Acervo do Autor (2014).

#### 4.2 PLACA DO COLETOR SOLAR

Placa do coletor Solar é formada por um painel com a parte superior coberta por uma placa de vidro que internamente abriga uma tubulação espiralada de cor preta para melhor absorção da energia dos raios solares que foi usada para aquecer a água que circula por ela. O painel está voltado para o norte e sua inclinação pode ser ajustada ao ângulo da latitude local, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 92 – Localização da placa de coletor solar no experimento



Fonte: CEESP - Centro de Excelências em Energia e Sistema de Potência-UFSM (2015).



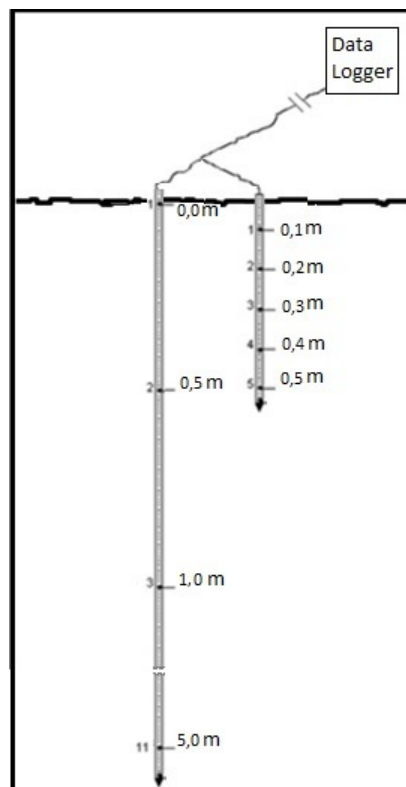
### 4.3 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉRMICOS

A instrumentação eletrônica e o controle dos equipamentos na sua maioria foram desenvolvidos, testados e calibrados nos laboratórios do CEESP-UFSM, alguns deles desenvolvidos para esta finalidade específica.

#### 4.3.1 Sondas multisensoras para medição geotérmica

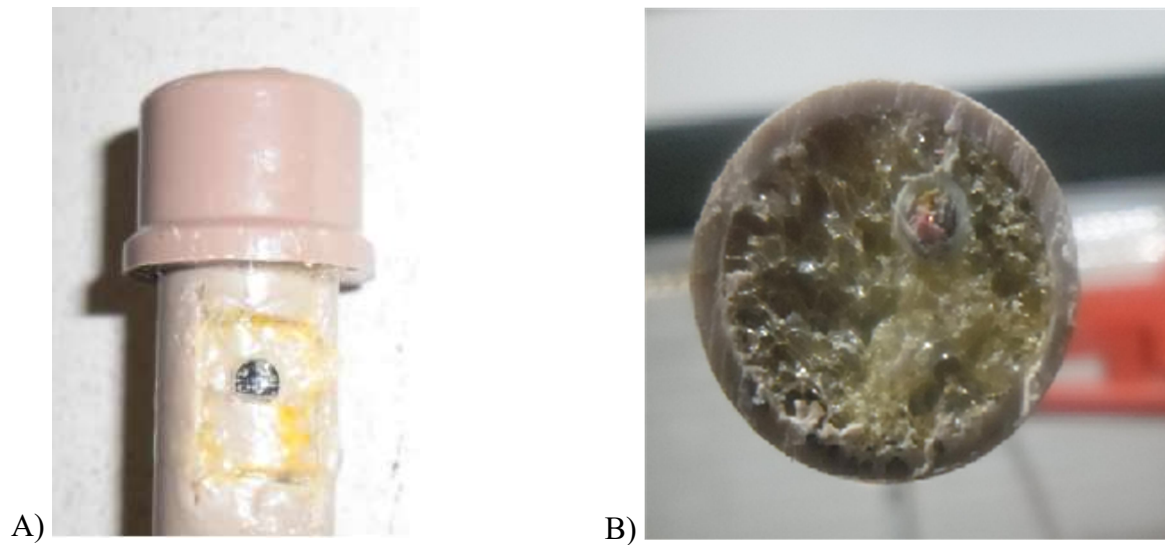
Para aquisição dos dados geotérmicos superficiais foram construídas e instaladas duas sondas multissensoras dedicadas para medição da temperatura no perfil vertical do solo usado para monitorar a variação diária e sazonal da temperatura em diversas profundidades. Estes dados foram utilizados na determinação da variação do fluxo de calor no solo em função do tempo e com isso estabelecer a difusividade térmica do solo. Estas sondas foram confeccionadas com tubos de PVC de 12 mm de diâmetro por atender adequadamente aos interesses da medição geotérmica deste projeto e por serem leves e flexíveis. O comprimento total das sondas é de 5 e 0,5 metros, com sensores dispostos com intervalos de 50 centímetros entre si na primeira e de 10 cm entre si na segunda, conforme mostra a Figura 13.

Figura 103 – Diagrama das sondas multissensoras.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Figura 114 – Detalhes construtivos da sonda multissensora



Fonte: Acervo do Autor (2014).

Para garantir uma boa confiabilidade nas leituras de temperatura foi escolhido um sensor de temperatura digital, com precisão de até 12 bits (4096 níveis de tensão). Possui apenas três terminais, sendo dois destes para alimentação e o terceiro para o barramento serial, onde é possível ligar vários sensores multiplexados, pois cada dispositivo possui um código serial próprio, de tal forma que o microprocessador consegue reconhecer cada um deles individualmente.

Nestes terminais é possível ligar vários sensores multiplexados, pois cada dispositivo possui um código serial próprio, de tal forma que o microprocessador consegue reconhecer cada um deles individualmente. As principais características deste dispositivo são:

- Barramento único para múltiplos sensores
- Cada sensor tem um código serial armazenado de 64 bits na ROM.
- Não necessita componentes externos
- Pode ser alimentado pelo cabo de dados
- Mede temperaturas na faixa de -55 °C a 125 °C

Maiores detalhes sobre sensor de temperatura utilizado são mostrados no ANEXO A.

O PVC tem a característica de ser leve, resistente às intempéries, fácil de encontrar no mercado local, não reagir com o solo por oxidação ou corrosão, além de ser maleável e barato.

O cabo utilizado para os dados nas sondas multisensoras são do tipo RJ45, apropriados para a transmissão de sinais digitais. O cabo é formado por três fios trançados entre si para anular efeitos espúrios capacitivos/indutivos. Os sensores são fixados através de orifícios de 4 mm de diâmetro no cano de PVC (mesmo diâmetro do encapsulamento do sensor) com distanciamento de 0,5 metro para a sonda de 5 metros e com distanciamento de 0.1 metro na sonda de 0,5 metro de comprimento. Após a soldagem e isolamento dos sensores de temperatura da sonda, eles foram cuidadosamente fixados no tubo com cola epóxi (Figura 13 A). Todo o espaço interno da sonda foi preenchido com poliuretano expandido (Figura 13 B) de forma a isolar termicamente todo o seu interior, evitando a circulação de ar na sonda e a geração de erros nas medidas.

#### 4.4 MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA

O monitoramento das temperaturas de entrada e de saída da água no trocador foi realizado também por sensores digitais e a vazão do fluido foi feita com a ajuda de uma bomba d'água com velocidade controlada.

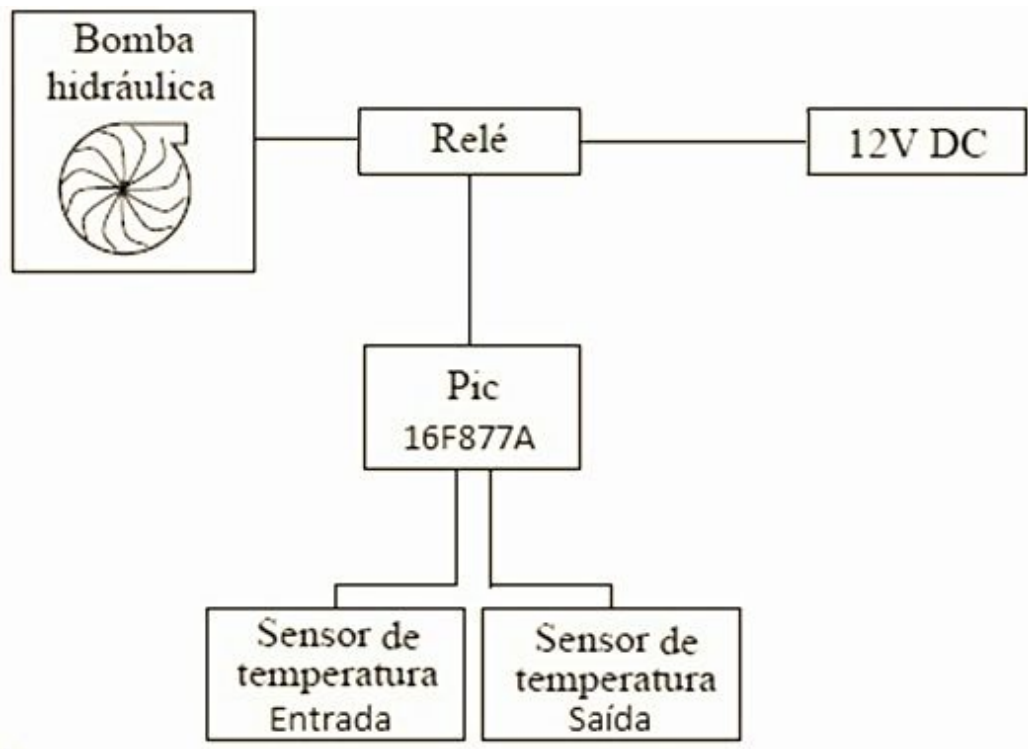
Nos testes práticos foi considerado um solo com características genéricas, isto é a resistência térmica do solo é muito maior do que a soma das resistências térmicas da água e da mangueira. Para haver trocas de calor entre a água de circulação e o solo e com o dissipador no ambiente é necessário estabelecer uma velocidade ótima do fluxo de água. Caso contrário, se a velocidade do fluxo de água for muito baixa, a troca de calor da água com o solo não é bem aproveitada. Uma vez determinado o valor máximo da energia térmica possível de ser extraída do solo pode-se determinar o fluxo de calor no solo para aquele instante. A partir daí, pode-se então usá-los como referência para dimensionamento de novas estruturas de troca geotérmicas semelhantes. O diagrama de blocos da Figura 15 ilustra o esquema elétrico do controle da bomba de água e das temperaturas de entrada e saída, valores esses utilizados no cálculo da máxima transferência térmica.

#### 4.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados foi formado por uma placa microcontroladora que utiliza um processador e microcontrolador do tipo PIC. Esta placa realiza o armazenamento de dados em arquivos no formato .txt através de um cartão de memória SD (Secure Digital).

A placa possui também um circuito RTC (real time clock) do tipo PCF 8583, possibilitando que os dados sejam referenciados em hora, minuto e segundos e armazenadas em pastas com identificação do dia, mês e ano.

Figura 12 – Diagrama de blocos do controle e da aquisição de dados



Fonte: CEESP – Centro de Excelências em Energia e Sistema de Potência-UFSM (2016).

O microprocessador tem uma grande capacidade de processamento, aquisição e armazenamento de dados, sendo assim, considerando que o solo tem uma inércia térmica alta, optou-se por fazer a aquisição de dados em intervalos de dois minutos. As características desta placa de aquisição atendem a todas as necessidades propostas nesta tese no que se refere à taxa de aquisição, precisão, armazenamento e velocidade de processamento das informações obtidas. Os detalhes construtivos da placa podem ser vistos no Anexo C.

#### 4.6 RESUMO DO CAPÍTULO 4

Este capítulo é uma abordagem teórica das características térmicas do solo. A seção 4.2 descreve os trocadores de calor geotérmicos instalados no subsolo nas profundidades de 1,5; 3,5 e 5 metros para uma abertura de solo de 15 metros quadrados. São mostrados os

detalhes construtivos da placa do coletor solar e do desenvolvimento da instrumentação eletrônica e medição dos parâmetros geotérmicos. São descritos também as características da placa de aquisição de dados e o controle da bomba hidráulica.

## **5 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS**

### **5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS**

O levantamento dos dados geotérmicos do perfil vertical do solo apresentados neste capítulo foi desenvolvido na área experimental do CEESP, no Campus Central da UFSM em Santa Maria-RS (Lat. 29° 43' 02" S e Long 53° 43' 06" O). Foram realizados ciclos de medições anuais e ciclos de medições diárias.

#### **5.1.1 Medições do Ciclo Anual**

As medições do ciclo anual de temperaturas do solo foram registradas a cada 2 minutos de intervalo, durante as 24 horas do dia, entre setembro de 2013 e agosto de 2014 e um segundo período setembro de 2016 e agosto de 2017 até a profundidade máxima de 5 metros. Durante o período de medições ocorreram algumas interrupções devido a problemas de registros no cartão de memória.

As figuras 16 e 17 mostram o comportamento da temperatura no solo em função da profundidade durante os períodos analisados. A variação anual da temperatura no perfil vertical do solo ocorre de forma senoidal em função da variação sazonal de temperatura. Ocorre também um amortecimento da amplitude com o aumento da profundidade. Nota-se também que há uma defasagem de tempo entre os valores máximos de temperatura em cada profundidade.

As mais temperaturas superficiais ocorreram nos meses de dezembro de 2013 e dezembro de 2016 e ainda em janeiro de 2014 e janeiro de 2017. Até 5 metros de profundidade, as temperaturas mais altas medidas ocorreram no mês de abril de 2014 e no mês abril de 2017. Estas duas características (amplitude e defasagem) são de extrema importância para a determinação da difusividade térmica aparente do solo através dos métodos propostos.

Quadro 1 – Formato dos dados diários de temperatura em °C, obtidos da sonda térmica padrão para as diversas profundidades.

horário	sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7	sensor 8	sensor 9	sensor 10
00:00	10,18	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,37
00:02	10,12	18,43	20,25	21,81	22,87	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,37
00:04	10,18	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,5
00:06	10,18	18,43	20,25	21,75	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,56
00:08	10,06	18,43	20,31	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,68
00:10	10,12	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,62	22,25	21,87	21,68	10,68
00:12	10,25	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,62
00:14	10,18	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,62
00:16	10,18	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,62
00:18	10,12	18,43	20,25	21,75	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,56
00:20	10,18	18,43	20,25	21,75	22,93	22,68	22,56	22,18	21,87	21,68	10,56
00:22	10,12	18,43	20,25	21,75	22,93	22,68	22,56	22,18	21,93	21,68	10,56
00:24	10,18	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,5
00:26	10,25	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,43
00:28	10,12	18,43	20,25	21,75	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,5
00:30	10,18	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,5
00:32	10,31	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,5
00:34	10,37	18,43	20,25	21,81	22,87	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,56
00:36	10,37	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,87	21,68	10,68
00:38	10,37	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,56
00:40	10,43	18,43	20,25	21,81	22,93	22,68	22,56	22,25	21,93	21,68	10,43

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

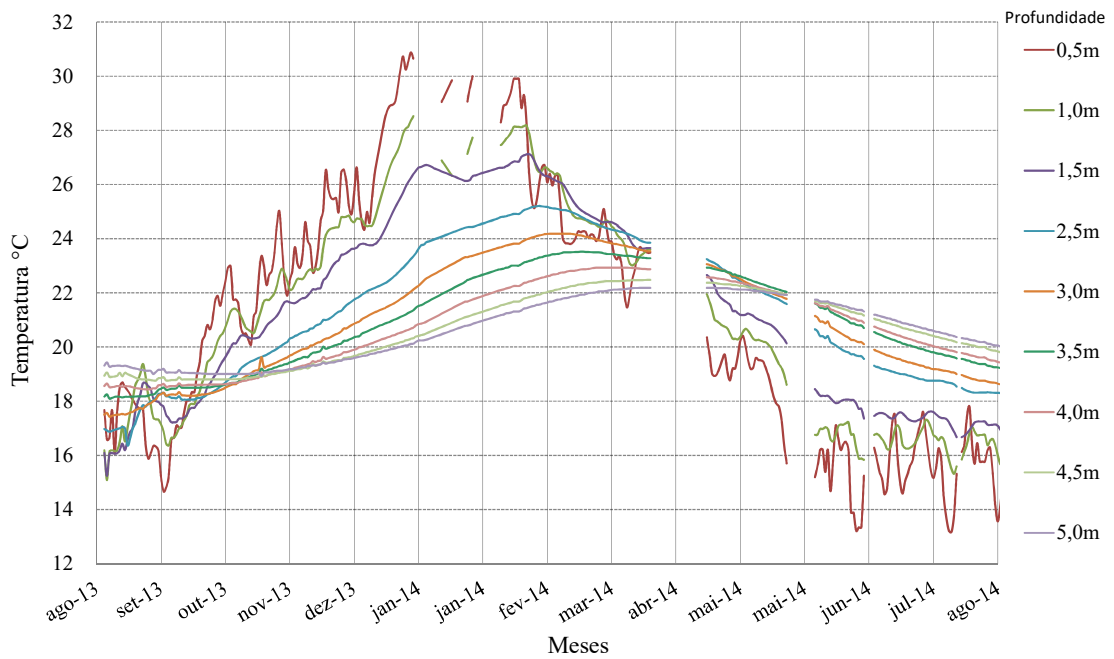
A partir dos dados brutos foi calculada a média diária para cada profundidade, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Médias diárias (°C)

	Ambiente	0,5m	1,0m	1,5m	2,5m	3,0m	3,5m	4,0m	4,5m	5,0m
03/out/17	20,58	19,70	20,24	20,21	19,97	19,64	19,69	19,59	19,59	19,68
04/out/17	22,11	19,11	19,72	19,88	19,75	19,43	19,51	19,43	19,45	19,57
05/out/17	25,26	19,71	19,69	19,85	19,75	19,44	19,53	19,43	19,47	19,57
06/out/17	21,84	20,36	19,82	19,81	19,78	19,47	19,55	19,43	19,48	19,57
07/out/17	19,13	20,24	20,00	19,85	19,80	19,50	19,56	19,45	19,49	19,57
08/out/17	21,59	20,07	20,06	19,89	19,81	19,50	19,56	19,47	19,50	19,58
09/out/17	21,86	20,61	20,12	19,93	19,81	19,51	19,57	19,49	19,50	19,58
10/out/17	19,66	20,86	20,30	20,00	19,81	19,53	19,59	19,50	19,50	19,59
11/out/17	16,57	20,29	20,41	20,07	19,84	19,55	19,61	19,50	19,50	19,59
12/out/17	18,28	19,58	20,30	20,13	19,87	19,56	19,62	19,50	19,50	19,60
13/out/17	17,09	19,56	20,12	20,13	19,88	19,57	19,62	19,51	19,50	19,61
14/out/17	16,07	19,17	20,00	20,11	19,92	19,59	19,62	19,53	19,51	19,61
15/out/17	17,85	18,98	19,85	20,06	19,93	19,61	19,64	19,54	19,52	19,62

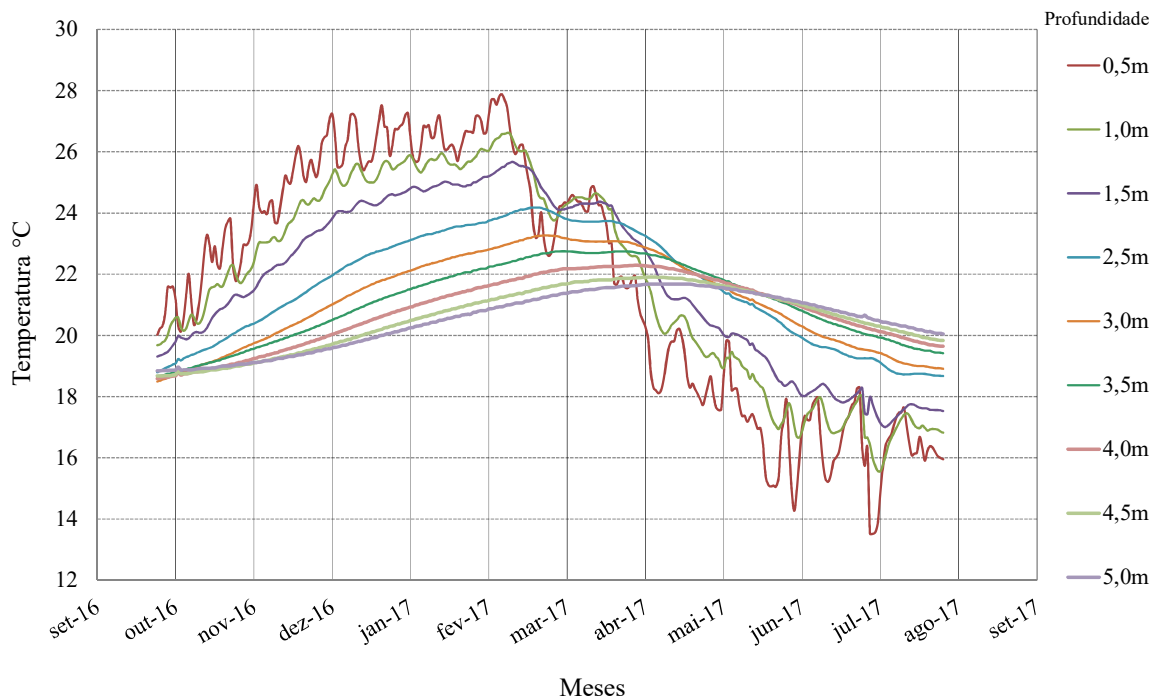
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Figura 13 – Temp. médias diárias no período de set/2013 até ago/2014, nas diversas profundidades, até 5 metros



Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

Figura 14 – Temperaturas médias diárias no período de set/2016 até ago/2017



Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

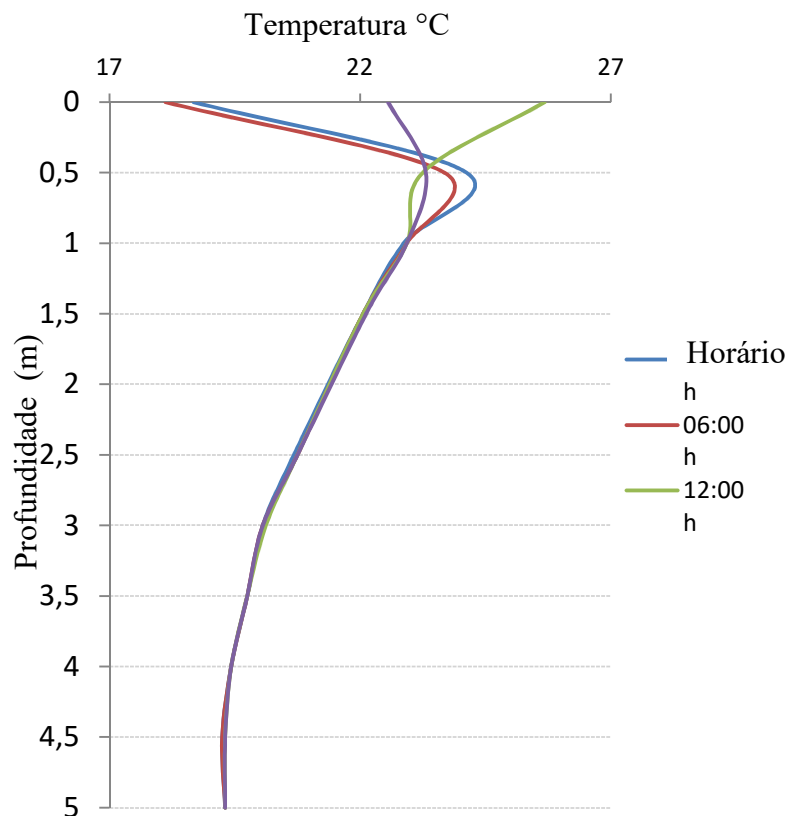


### 5.1.2 Medições do Ciclo Diário

Além do ciclo anual de temperatura, o solo também é submetido a um ciclo diário de variação de temperatura na sua camada mais superficial, em função do aquecimento pela atividade solar durante o dia e pelo resfriamento durante a noite. As medições dos ciclos diários ocorreram entre janeiro e maio de 2018. Usaram-se dados dos dias ensolarados sem nuvens com o solo não saturado de água e próximo da superfície até a profundidade de 0,5 m. É nesta região do solo que ocorrem as maiores variações diárias de temperatura. Os dados obtidos pelo datalogger foram armazenados conforme o Quadro 1.

A Figura 18 mostra como os valores de temperatura variam na superfície do solo durante um dia ensolarado. As linhas da figura correspondem a intervalo de 6 horas. O solo apresentou variação diária temperaturas até a profundidade próxima de 1 metro. Na superfície, a maior temperatura ocorreu próximo do meio dia e a 0.6 metro de profundidade a máxima ocorreu a meia noite, devido as características da condutividade térmica do solo.

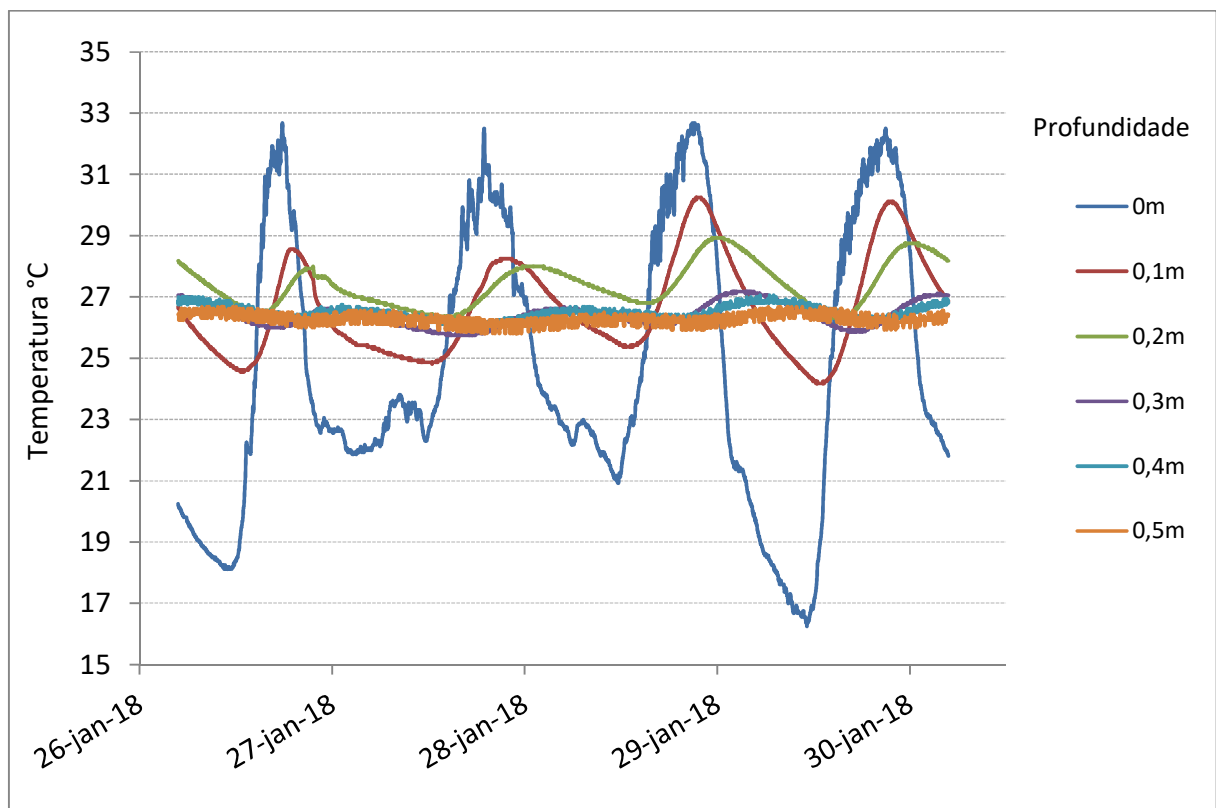
Figura 15 – Variação térmica do solo em diferentes horários de um mesmo dia (22/09/2013) Local: CEESP-UFSM em Santa Maria-RS



Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

A Figura 19 mostra uma sequência de quatro períodos diários contínuos com dias ensolarados e com pouca incidência de nuvens. A temperatura na superfície (0 m) segue uma curva senoidal durante as 24 horas do dia, conforme esperado. Pode-se perceber que as senoides que correspondem às profundidades mais superficiais possuem maiores amplitudes em cada um dos ciclos. A maior senoide e mais irregular corresponde a temperatura na superfície do solo, sendo influenciados pela presença de nuvens e outras características climáticas momentâneas.

Figura 16 – Ciclos Diários de Temperatura no Solo no período de 26 a 30 de janeiro de 2018



Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

## 5.2 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE APARENTE DO SOLO

A partir dos dados levantados na seção 5.1 foi possível obter os valores da difusividade aparente através do processamento das temperaturas coletadas durante os períodos de medições. Para isto foi utilizado um software específico para cálculo numérico e operações com matrizes com os métodos apresentados da Amplitude Direta - AMP1, Método do Arcotangente - AMP2, Métodos da Fase Direta - PHA1, Método do Logaritmo - PHA2 e

Método Numérico de Diferenças Finitas - NUM. Os cálculos foram feitos combinando uma profundidade de referência com todas as demais, com distância entre os sensores de 0,5 metros no ciclo anual e 0,1 m no ciclo diário. Assim, foram gerados perfis verticais de difusividade térmica nas respectivas camadas.

### **5.2.1 Ciclo Anual**

Os valores de difusividade aparente são obtidos através do processamento dos dados anuais de temperatura coletados levando em conta o período e a profundidade. Os valores são apresentados nos Quadros 3 e 4 e visualizados nas Figuras 20 e 21.

Quadro 3 – Difusividade Térmica Aparente do Solo (m<sup>2</sup>/s) - Ciclo Anual 2013/14

<b>0 m</b>	<b>0,5 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>
Amp1	6,87E-06	5,13E-06	6,23E-06	1,80E-05	9,68E-06	1,11E-05	1,25E-05	1,42E-05	<b>1,05E-05</b>	4,38221E-06
Amp2	3,10E-08	6,54E-08	9,75E-08	4,05E-07	7,78E-07	1,50E-06	2,77E-06	5,44E-06	<b>1,39E-06</b>	1,88891E-06
Pha1	1,46E-07	6,34E-07	1,56E-06	1,58E-07	3,14E-06	2,33E-06	1,91E-06	1,47E-06	<b>1,42E-06</b>	1,06084E-06
Pha2	5,16E-04	4,05E-03	4,88E-01	3,27E-03	1,70E-03	1,15E-03	9,28E-04	0,000807456	<b>6,25E-02</b>	0,171762212
Num	4,02E-07	8,25E-07	1,38E-06	1,68E-06	2,05E-06	1,99E-06	2,44E-06	2,67E-06	<b>1,68E-06</b>	7,7775E-07
<b>0,5 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>	
Amp1	3,97E-06	5,94E-06	2,51E-05	1,04E-05	1,21E-05	1,38E-05	1,59E-05	<b>1,24682E-05</b>	6,97941E-06	
Amp2	2,18E-07	2,59E-07	3,97E-07	4,57E-07	4,99E-07	5,55E-07	7,04E-07	<b>4,41192E-07</b>	1,68574E-07	
Pha1	8,38E-05	1,58E-07	6,94E-08	6,93E-07	6,93E-07	6,93E-07	6,34E-07	<b>1,23934E-05</b>	3,14948E-05	
Pha2	6,30E-03	1,71E-03	9,26E-04	6,97E-04	5,72E-04	5,21E-04	4,92E-04	<b>0,001603288</b>	0,002114974	
Num	5,14E-07	9,53E-07	1,43E-06	1,60E-06	1,51E-06	2,32E-06	2,01E-06	<b>1,47712E-06</b>	6,08973E-07	
<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>		
Amp1	9,85E-06	1,03E-04	1,47E-05	1,68E-05	1,89E-05	2,16E-05	<b>3,07188E-05</b>	3,54292E-05		
Amp2	3,13E-07	5,09E-07	5,79E-07	6,20E-07	6,84E-07	7,28E-07	<b>5,72273E-07</b>	1,4841E-07		
Pha1	4,14E-08	3,96E-08	4,60E-07	4,96E-07	5,22E-07	4,96E-07	<b>3,42526E-07</b>	2,34793E-07		
Pha2	7,84E-04	6,37E-04	5,12E-04	4,40E-04	4,16E-04	4,04E-04	<b>0,00053228</b>	0,000150261		
Num	2,95E-07	9,51E-07	1,32E-06	1,24E-06	1,73E-06	1,44E-06	<b>1,1628E-06</b>	4,95444E-07		
<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>			
Amp1	7,92E-03	1,71E-05	1,97E-05	2,22E-05	2,55E-05	<b>0,001600492</b>	0,003531643			
Amp2	6,84E-07	7,47E-07	7,68E-07	8,36E-07	8,75E-07	<b>7,82027E-07</b>	7,47948E-08			
Pha1	3,88E-08	9,31E-06	3,35E-06	2,18E-06	1,43E-06	<b>3,26207E-06</b>	3,58989E-06			
Pha2	5,79E-04	4,52E-04	3,90E-04	3,74E-04	3,69E-04	<b>0,000432897</b>	8,80435E-05			
Num	7,37E-07	1,03E-06	1,38E-06	1,34E-06	1,17E-06	<b>1,13322E-06</b>	2,60622E-07			
<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>				
Amp1	1,78E-06	4,68E-06	7,65E-06	1,09E-05	<b>6,25602E-06</b>	3,9191E-06				
Amp2	9,02E-07	8,68E-07	9,66E-07	1,00E-06	<b>9,34231E-07</b>	6,01815E-08				
Pha1	1,19E-08	6,29E-08	1,96E-07	6,07E-07	<b>2,19525E-07</b>	2,69804E-07				
Pha2	2,98E-04	2,81E-04	2,93E-04	3,04E-04	<b>0,000294054</b>	1,01024E-05				
Num	3,50E-07	6,13E-07	9,38E-07	1,13E-06	<b>7,58144E-07</b>	3,4625E-07				
<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>					
Amp1	3,23E-05	3,54E-05	4,21E-05	<b>3,65923E-05</b>	5,006E-06					
Amp2	8,37E-07	1,00E-06	1,04E-06	<b>9,58576E-07</b>	1,06834E-07					
Pha1	6,93E-07	6,93E-07	5,51E-07	<b>6,45455E-07</b>	8,17949E-08					
Pha2	2,64E-04	2,91E-04	3,06E-04	<b>0,000287103</b>	2,12042E-05					
Num	2,76E-07	7,20E-07	9,47E-07	<b>6,47544E-07</b>	3,41532E-07					
<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>						
Amp1	3,91E-05	4,87E-05	<b>4,39455E-05</b>	6,79391E-06						
Amp2	1,22E-06	1,17E-06	<b>1,19212E-06</b>	3,63905E-08						
Pha1	6,93E-07	4,96E-07	<b>5,94311E-07</b>	1,39114E-07						
Pha2	3,21E-04	3,31E-04	<b>0,000325981</b>	7,43922E-06						
Num	4,01E-07	6,95E-07	<b>5,4789E-07</b>	2,08249E-07						
<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>								
Amp1	6,95E-07	<b>6,951E-07</b>								
Amp2	1,12E-06	<b>1,118E-06</b>								
Pha1	3,73E-07	<b>3,725E-07</b>								
Pha2	3,42E-04	<b>0,0003423</b>								
Num	3,48E-07	<b>3,48E-07</b>								

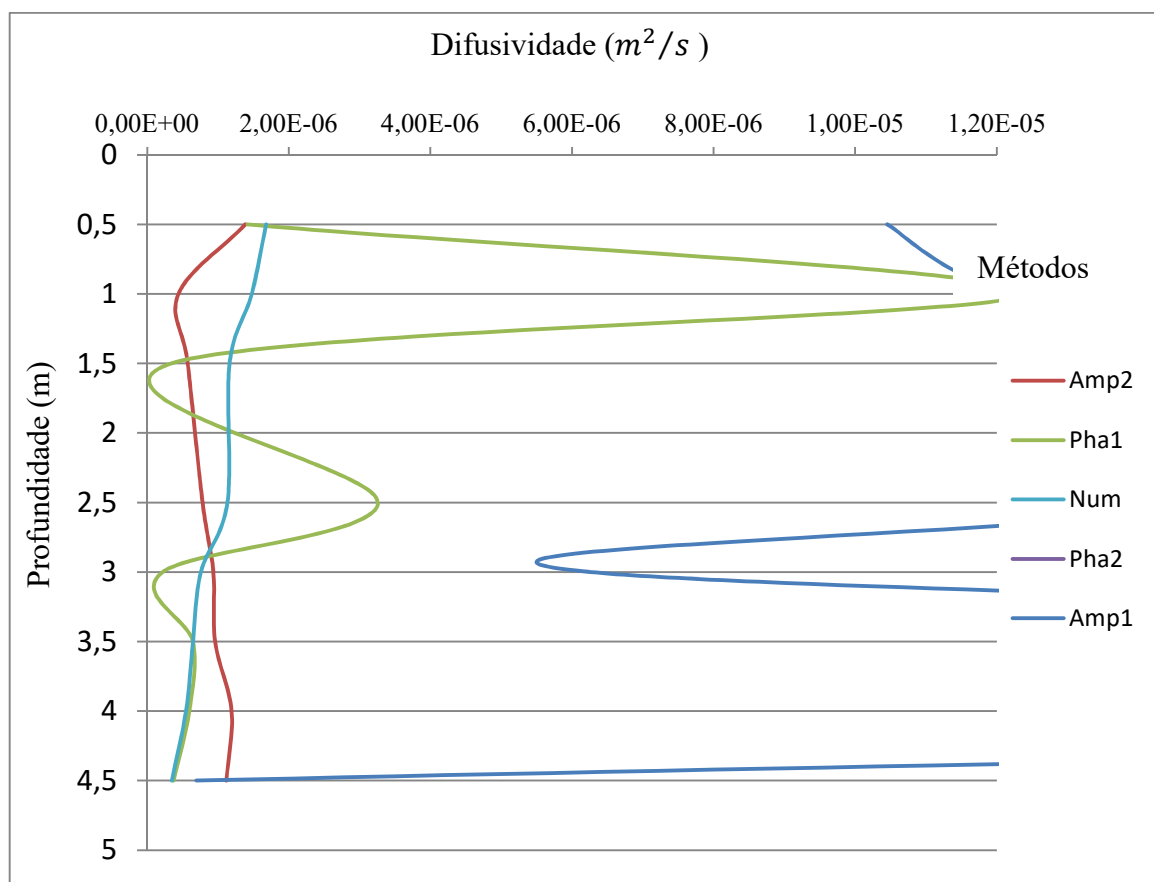
Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

Nos ciclos anuais de 2013-2014 e 2016-2017, demonstrados na Figura 4, os valores obtidos pelos métodos Amp1 e PHA2 tiveram variações acentuadas para pequenas variações de profundidade. O Método PHA1 apresentou seus valores oscilando entre  $10^{-7}$  e  $10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s). O Método do AMP2 apresentou boa estabilidade nos resultados em todas as camadas

medidas. O Método NUM teve valores equilibrados em todas as profundidades analisadas e acusou uma diminuição na difusividade com o aumento da profundidade.

Na Figura 22 têm-se os valores plotados da difusividade térmica para o período 2013-14 e 2016-17 obtidos pelo Método Numérico de Diferenças Finitas - NUM e Método do Arcotangente - AMP2. Estes dois métodos foram os que apresentaram maior estabilidade e adequados para as medidas realizadas.

Figura 17 – Valores da difusividade aparente obtidos no ciclo anual 2013/14



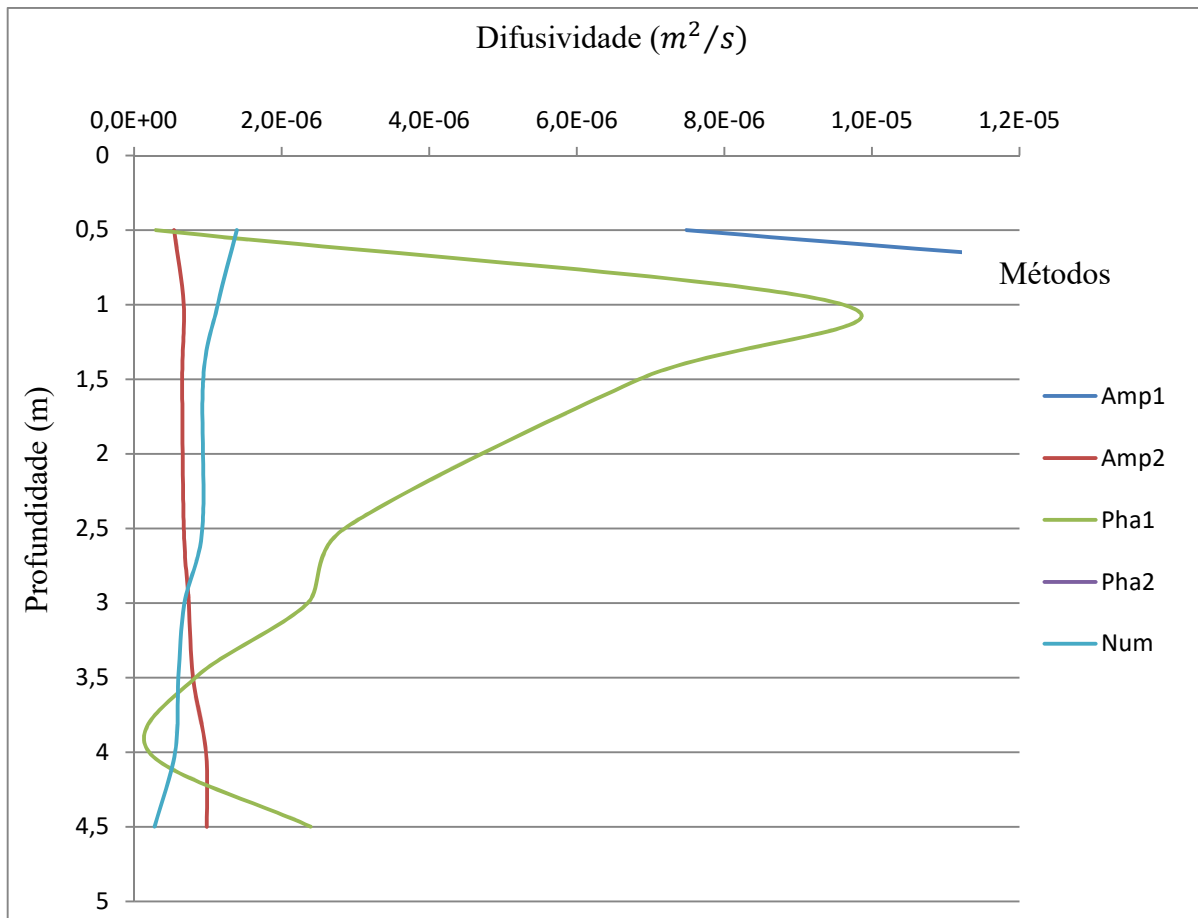
Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

Quadro 4 – Difusividade Térmica Aparente do Solo (m<sup>2</sup>/s) - Ciclo Anual 2016/17

<b>0m</b>	<b>0,5 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>
<b>Amp1</b>	1,24E-06	2,79E-06	4,41E-06	7,60E-06	8,49E-06	1,01E-05	1,17E-05	1,35E-05	<b>7,49E-06</b>	4,36E-06
<b>Amp2</b>	2,20E-07	3,63E-07	4,25E-07	4,91E-07	5,17E-07	5,39E-07	6,94E-07	1,10E-06	<b>5,43E-07</b>	2,63E-07
<b>Pha1</b>	1,92E-08	7,24E-08	1,54E-07	3,36E-07	4,39E-07	5,10E-07	3,89E-07	4,46E-07	<b>2,96E-07</b>	1,87E-07
<b>Pha2</b>	6,09E-04	9,53E-04	8,19E-04	5,76E-04	5,23E-04	4,70E-04	4,76E-04	0,00046023	<b>6,11E-04</b>	0,000181
<b>Num</b>	3,85E-07	7,18E-07	9,13E-07	1,66E-06	1,99E-06	1,49E-06	1,81E-06	2,18E-06	<b>1,39E-06</b>	6,48E-07
<b>0,5 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>	
<b>Amp1</b>	1,13E-05	1,43E-05	1,92E-05	1,86E-05	2,11E-05	2,38E-05	2,68E-05	<b>1,93006E-05</b>	5,30891E-06	
<b>Amp2</b>	7,05E-07	6,54E-07	6,39E-07	6,48E-07	6,57E-07	6,91E-07	7,21E-07	<b>6,73594E-07</b>	3,16681E-08	
<b>Pha1</b>	2,15E-05	2,15E-05	8,15E-06	7,45E-06	5,38E-06	1,56E-06	1,64E-06	<b>9,60604E-06</b>	8,5356E-06	
<b>Pha2</b>	1,70E-03	9,68E-04	5,68E-04	5,08E-04	4,52E-04	4,61E-04	4,46E-04	<b>0,000729315</b>	0,000467035	
<b>Num</b>	6,17E-07	9,35E-07	1,15E-06	1,28E-06	1,09E-06	1,26E-06	1,62E-06	<b>1,13539E-06</b>	3,10252E-07	
<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>		
<b>Amp1</b>	1,86E-05	2,37E-05	2,15E-05	2,46E-05	2,78E-05	3,14E-05	<b>2,46288E-05</b>	4,53761E-06		
<b>Amp2</b>	6,08E-07	6,20E-07	6,35E-07	6,48E-07	6,89E-07	7,23E-07	<b>6,53767E-07</b>	4,39834E-08		
<b>Pha1</b>	2,15E-05	6,41E-06	6,12E-06	4,45E-06	1,24E-06	1,35E-06	<b>6,84872E-06</b>	7,53316E-06		
<b>Pha2</b>	6,24E-04	4,36E-04	4,10E-04	3,76E-04	3,95E-04	3,89E-04	<b>0,000438339</b>	9,31193E-05		
<b>Num</b>	2,91E-07	9,75E-07	1,08E-06	1,09E-06	1,01E-06	1,18E-06	<b>9,37738E-07</b>	3,24595E-07		
<b>1,5 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>			
<b>Amp1</b>	2,71E-05	2,26E-05	2,66E-05	3,05E-05	3,48E-05	<b>2,83089E-05</b>	4,58176E-06			
<b>Amp2</b>	6,25E-07	6,44E-07	6,58E-07	7,07E-07	7,45E-07	<b>6,7592E-07</b>	4,92536E-08			
<b>Pha1</b>	4,25E-06	4,59E-06	3,44E-06	9,34E-07	1,06E-06	<b>2,85621E-06</b>	1,74622E-06			
<b>Pha2</b>	3,73E-04	3,63E-04	3,37E-04	3,65E-04	3,63E-04	<b>0,000360139</b>	1,36669E-05			
<b>Num</b>	7,83E-07	8,39E-07	9,30E-07	9,07E-07	1,18E-06	<b>9,27038E-07</b>	1,50844E-07			
<b>2,5 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>				
<b>Amp1</b>	1,65E-05	2,61E-05	3,31E-05	4,00E-05	<b>2,89284E-05</b>	1,00544E-05				
<b>Amp2</b>	6,83E-07	6,94E-07	7,72E-07	8,18E-07	<b>7,41803E-07</b>	6,44853E-08				
<b>Pha1</b>	5,38E-06	2,85E-06	5,10E-07	6,80E-07	<b>2,35478E-06</b>	2,28154E-06				
<b>Pha2</b>	3,44E-04	3,06E-04	3,59E-04	3,59E-04	<b>0,000341998</b>	2,525E-05				
<b>Num</b>	3,08E-07	6,00E-07	7,40E-07	1,09E-06	<b>6,83876E-07</b>	3,23709E-07				
<b>3 m</b>	<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>					
<b>Amp1</b>	4,77E-05	5,29E-05	6,04E-05	<b>5,36448E-05</b>	6,42066E-06					
<b>Amp2</b>	7,05E-07	8,22E-07	8,73E-07	<b>7,99961E-07</b>	8,59438E-08					
<b>Pha1</b>	1,76E-06	2,81E-07	4,61E-07	<b>8,3325E-07</b>	8,05449E-07					
<b>Pha2</b>	2,73E-04	3,68E-04	3,64E-04	<b>0,000335062</b>	5,33616E-05					
<b>Num</b>	2,07E-07	6,53E-07	9,47E-07	<b>6,0222E-07</b>	3,72446E-07					
<b>3,5 m</b>	<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>						
<b>Amp1</b>	9,47E-07	6,88E-05	<b>3,48849E-05</b>	4,79956E-05						
<b>Amp2</b>	9,71E-07	9,80E-07	<b>9,75468E-07</b>	5,86985E-09						
<b>Pha1</b>	1,10E-07	2,98E-07	<b>2,03912E-07</b>	1,33035E-07						
<b>Pha2</b>	5,20E-04	4,27E-04	<b>0,000473748</b>	6,55573E-05						
<b>Num</b>	4,10E-07	7,07E-07	<b>5,5836E-07</b>	2,1031E-07						
<b>4 m</b>	<b>4,5 m</b>	<b>Média</b>								
<b>Amp1</b>	8,14E-05	<b>8,137E-05</b>								
<b>Amp2</b>	9,88E-07	<b>9,88E-07</b>								
<b>Pha1</b>	2,39E-06	<b>2,392E-06</b>								
<b>Pha2</b>	3,57E-04	<b>0,0003574</b>								
<b>Num</b>	2,80E-07	<b>2,798E-07</b>								

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017).

Figura 18 – Valores da difusividade aparente obtidos no ciclo anual 2016/17

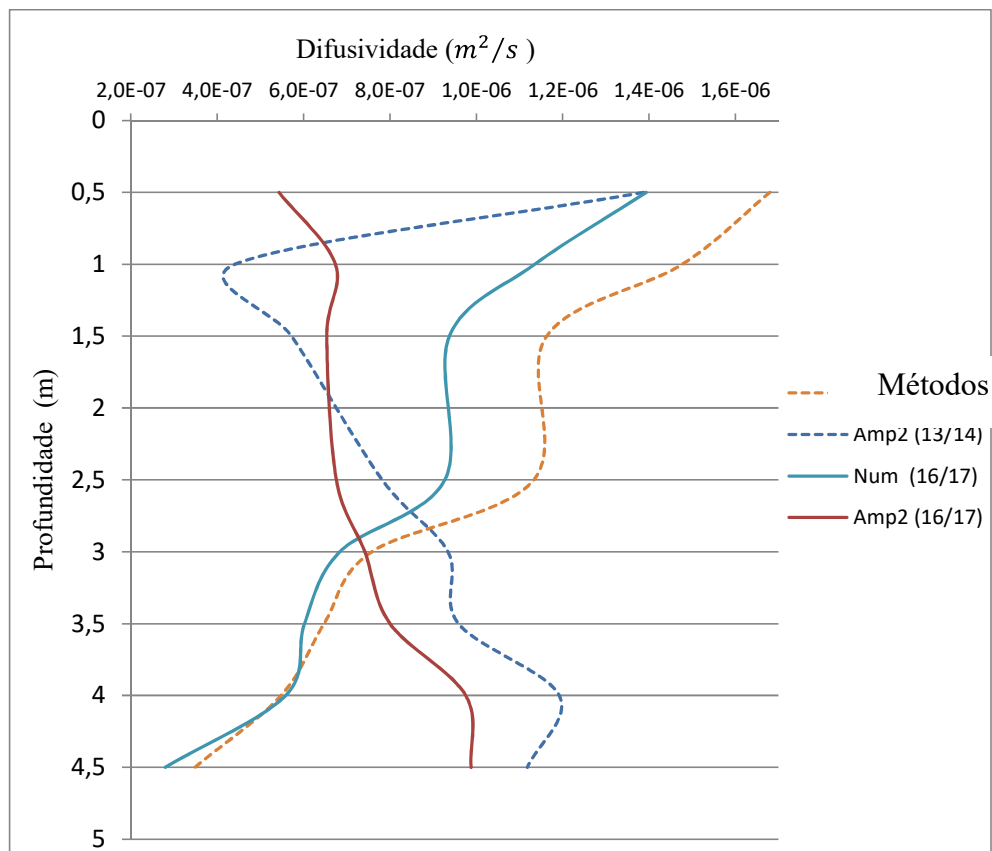


Fonte: Elaborada pelo Autor (2017).

### 5.2.2 Ciclos Diários

Nos ciclos diários foram considerados para o cálculo da difusividade aparente do solo na região mais superficial apenas os dias ensolarados sem a presença de nuvens e com o solo não saturado de água. Essas duas características afetam a eficácia dos métodos e alteram as características térmicas do solo, respectivamente. O Quadro 5 mostra os dias que apresentaram as condições adequadas para o cálculo da difusibilidade.

Figura 19 – Difusividade Aparente do solo nos ciclos 2013/14 e 2016/17 pelos Métodos Numérico de Diferenças Finitas - NUM e Arcotangente - AMP2



Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

Quadro 5 – Dias utilizados no cálculo da difusibilidade pelo ciclo diário

Período	Nº de dias	Dia do mês considerados
Janeiro/2018	4	22, 27, 29, 30
Fevereiro/2018	6	7, 17, 23, 24, 25, 26
Março/2018	11	1, 2, 4, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 21, 22
Mai/2018	7	4, 7, 8, 14, 25, 26, 27

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

A determinação da difusividade aparente foi estimada pela média dos valores diários dos meses analisados.

O Quadro 6 apresenta os valores de difusividade obtidos pelos cinco métodos propostos. Os valores obtidos são resultados da combinação das profundidades entre si, para cada um dos meses analisados de 2018. O Quadro 7 é uma síntese do com apenas os valores das médias da difusividade aparente em cada profundidade, obtida por cada um dos métodos empregados neste período.



Quadro 6 – Difusividade Térmica Aparente do Solo (m<sup>2</sup>/s) - Ciclos Diários

Janeiro/18							Fevereiro/18						
<b>0,1 m</b>	<b>0,1 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>	<b>0,1 m</b>	<b>0,1 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>
Amp1	2,65E-05	1,46E-04	1,59E-04	2,41E-04	0,000143	8,83E-05	Amp1	2,25E-05	2,44E-04	3,77E-04	8,22E-04	0,000367	0,000337
Amp2	3,16E-07	8,42E-07	6,55E-06	5,70E+00	1,42547	2,850934	Amp2	2,38E-07	1,16E-06	1,89E-05	1,57E-02	0,003937	0,007861
Pha1	6,61E-07	8,60E-07	2,65E-07	4,80E-07	5,66E-07	2,54E-07	Pha1	9,86E-06	8,02E-08	1,82E-07	3,22E-07	2,61E-06	4,84E-06
Pha2	1,61E-07	3,24E-07	4,11E-07	5,19E-07	3,54E-07	1,51E-07	Pha2	1,29E-07	3,04E-07	4,90E-07	7,30E-07	4,13E-07	2,58E-07
Num	1,05E-06	2,03E-06	6,02E-06	1,06E-05	4,91E-06	4,33E-06	Num	3,06E-07	1,64E-06	3,60E-06	4,30E-06	2,46E-06	1,83E-06
<b>0,2 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>		<b>0,2 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>	
Amp1	1,22E-03	2,08E-03	2,23E-03	0,001841	0,000548		Amp1	1,45E-04	1,25E-03	1,76E-03	0,001052	0,000826	
Amp2	6,38E-07	7,83E-07	2,85E-06	1,42E-06	1,24E-06		Amp2	5,87E-07	6,57E-07	2,21E-06	1,15E-06	9,15E-07	
Pha1	1,17E-06	8,02E-08	1,83E-07	4,76E-07	5,99E-07		Pha1	1,84E-08	7,40E-08	1,66E-07	8,61E-08	7,45E-08	
Pha2	9,53E-07	8,36E-07	9,59E-07	9,16E-07	6,94E-08		Pha2	1,41E-06	1,78E-06	2,51E-06	1,9E-06	5,58E-07	
Num	4,09E-07	1,01E-05	2,56E-05	1,21E-05	1,27E-05		Num	3,65E-07	7,22E-06	1,47E-05	7,43E-06	7,17E-06	
<b>0,3 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>			<b>0,3 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>		
Amp1	1,90E-04	4,71E-04	0,00033	0,000199			Amp1	1,43E-03	3,00E-02	0,015712	0,0202		
Amp2	9,85E-07	8,41E-07	9,13E-07	1,02E-07			Amp2	7,39E-07	1,13E-06	9,32E-07	2,73E-07		
Pha1	1,57E-08	6,36E-08	3,96E-08	3,39E-08			Pha1	1,19E-03	1,91E-02	0,010146	0,012661		
Pha2	7,39E-07	9,62E-07	8,51E-07	1,58E-07			Pha2	2,32E-06	3,61E-06	2,97E-06	9,12E-07		
Num	1,68E-06	2,58E-06	2,13E-06	6,36E-07			Num	1,60E-06	4,85E-06	3,22E-06	2,3E-06		
<b>0,4 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>					<b>0,4 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>			
Amp1	2,60E-03	0,002599					Amp1	4,50E-03	0,004501				
Amp2	7,26E-07	7,26E-07					Amp2	1,92E-06	1,92E-06				
Pha1	2,98E-04	0,000298					Pha1	4,77E-03	0,004775				
Pha2	1,30E-06	1,3E-06					Pha2	6,37E-06	6,37E-06				
Num	1,54E-06	1,54E-06					Num	1,61E-06	1,61E-06				
Março/18							Maio/18						
<b>0,1 m</b>	<b>0,1 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>	<b>0,1 m</b>	<b>0,1 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>
Amp1	6,51E-05	7,55E-04	6,03E-04	1,06E-03	0,00062	0,000415	Amp1	5,59E-06	2,60E-05	4,04E-05	6,88E-05	3,52E-05	2,66E-05
Amp2	3,04E-07	9,27E-07	9,77E-06	2,26E-03	0,000567	0,001126	Amp2	6,06E-07	7,41E-07	2,34E-06	4,65E-05	1,25E-05	2,26E-05
Pha1	1,20E-06	1,26E-06	2,41E-07	4,27E-07	7,83E-07	5,25E-07	Pha1	1,17E-06	8,05E-07	7,46E-07	1,03E-06	9,36E-07	1,95E-07
Pha2	1,78E-07	3,67E-07	5,28E-07	7,20E-07	4,48E-07	2,31E-07	Pha2	1,68E-07	2,96E-07	3,60E-07	4,31E-07	3,14E-07	1,12E-07
Num	4,98E-07	3,02E-06	4,37E-06	6,61E-06	3,62E-06	2,56E-06	Num	5,26E-07	1,06E-06	2,96E-06	7,17E-06	2,93E-06	3,01E-06
<b>0,2 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>		<b>0,2 m</b>	<b>0,2 m</b>	<b>0,3 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>	
Amp1	3,82E-04	1,27E+00	1,06E+01	3,941297	5,762178		Amp1	1,06E-03	1,67E-03	2,55E-03	0,001763	0,000751	
Amp2	5,76E-07	6,74E-07	2,50E-06	1,25E-06	1,08E-06		Amp2	9,26E-07	1,04E-06	2,57E-06	1,51E-06	9,19E-07	
Pha1	1,33E-06	8,12E-08	1,82E-07	5,3E-07	6,92E-07		Pha1	5,89E-07	6,17E-07	9,84E-07	7,3E-07	2,2E-07	
Pha2	1,15E-06	1,30E-06	1,64E-06	1,36E-06	2,52E-07		Pha2	6,51E-07	6,10E-07	6,74E-07	6,45E-07	3,25E-08	
Num	2,80E-07	6,63E-06	1,51E-05	7,34E-06	7,43E-06		Num	3,90E-07	6,59E-06	1,67E-05	7,9E-06	8,25E-06	
<b>0,3 m</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>			<b>0,3 m</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>		
Amp1	4,10E-04	1,59E-03	0,000998	0,000831			Amp1	1,58E-04	4,93E-04	0,000325	0,000237		
Amp2	8,01E-07	1,01E-06	9,04E-07	1,46E-07			Amp2	1,17E-06	7,56E-07	9,62E-07	2,9E-07		
Pha1	1,61E-08	6,41E-08	4,01E-08	3,39E-08			Pha1	6,46E-07	1,35E-06	9,97E-07	4,97E-07		
Pha2	1,47E-06	2,01E-06	1,74E-06	3,88E-07			Pha2	5,72E-07	6,85E-07	6,28E-07	8,02E-08		
Num	1,05E-06	2,36E-06	1,71E-06	9,24E-07			Num	1,12E-06	2,60E-06	1,86E-06	1,04E-06		
<b>0,4 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>				<b>0,4 m</b>	<b>0,4 m</b>	<b>Média</b>	<b>Desv</b>			
Amp1	1,38E+00	1,377787					Amp1	9,11E-03	0,00911				
Amp2	1,30E-06	1,3E-06					Amp2	5,30E-07	5,3E-07				
Pha1	4,77E-03	0,004775					Pha1	4,38E-06	4,38E-06				
Pha2	2,94E-06	2,94E-06					Pha2	8,36E-07	8,36E-07				
Num	1,20E-06	1,2E-06					Num	1,38E-06	1,38E-06				

Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

Quadro 7 – Médias da Difusividade Térmica Aparente do Solo ( $m^2/s$ ) - Ciclos Diários

<b>Amp1</b>					<b>Amp2</b>				
	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>		<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>
<b>Janeiro</b>	0,000143	0,001841	0,00033	0,002599	<b>Janeiro</b>	1,42547	1,42E-06	9,13E-07	7,26E-07
<b>Fevereiro</b>	0,000367	0,001052	0,015712	0,004501	<b>Fevereiro</b>	0,003937	1,15E-06	9,32E-07	1,92E-06
<b>Março</b>	0,00062	3,941297	0,000998	1,377787	<b>Março</b>	0,000567	1,25E-06	9,04E-07	1,3E-06
<b>Mai</b>	3,52E-05	0,001763	0,000325	0,00911	<b>Mai</b>	1,25E-05	1,51E-06	9,62E-07	5,3E-07
<b>Pha1</b>					<b>Pha2</b>				
	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>		<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>
<b>Janeiro</b>	5,66E-07	4,76E-07	3,96E-08	0,000298	<b>Janeiro</b>	3,54E-07	9,16E-07	8,51E-07	1,3E-06
<b>Fevereiro</b>	2,61E-06	8,61E-08	0,010146	0,004775	<b>Fevereiro</b>	4,13E-07	1,9E-06	2,97E-06	6,37E-06
<b>Março</b>	7,83E-07	5,3E-07	4,01E-08	0,004775	<b>Março</b>	4,48E-07	1,36E-06	1,74E-06	2,94E-06
<b>Mai</b>	9,36E-07	7,3E-07	9,97E-07	4,38E-06	<b>Mai</b>	3,14E-07	6,45E-07	6,28E-07	8,36E-07
<b>Num</b>									
	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>					
<b>Janeiro</b>	4,91E-06	1,21E-05	2,13E-06	1,54E-06					
<b>Fevereiro</b>	2,46E-06	7,43E-06	3,22E-06	1,61E-06					
<b>Março</b>	3,62E-06	7,34E-06	1,71E-06	1,2E-06					
<b>Mai</b>	2,93E-06	7,9E-06	1,86E-06	1,38E-06					

Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

Os métodos que se baseiam em poucas medidas num ciclo diário não reproduzem da mesma forma os resultados de cada mês analisado, como é visto nas figuras 23, 24, 25 e 26.

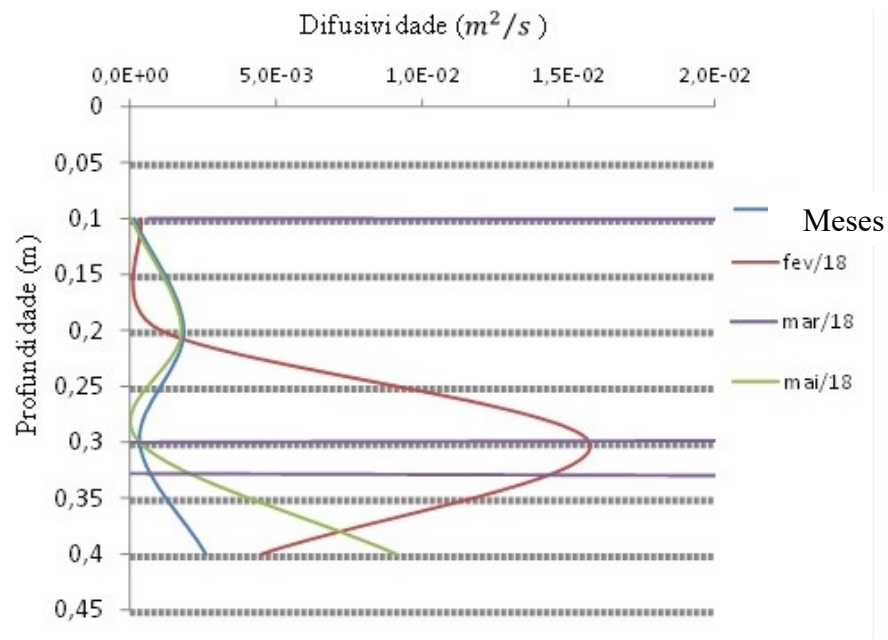
Na análise do ciclo diário pelo Método de Diferenças Finitas são feitas 30 estimativas por hora ou 720 durante todo o dia. Além disso, leva-se em consideração a temperatura na camada superior e inferior daquela que está sendo analisada. Os valores encontrados com esse método têm maior estabilidade nos resultados se comparados aos demais métodos analisados.

Como forma de comparação inicial, uma análise física em laboratório especializado, conforme ANEXO A, quantificou o solo extraído do sítio de testes como tendo 34,688% de areia, 36,352% de silte e 28,960% de argila, na profundidade de 0,5 metro. Levando em consideração, conforme Provedello 1996, os valores médios de difusividade específica para cada um dos minerais e considerando um teor de umidade baixo, a difusividade térmica esperada é da ordem de  $0,9 \times 10^{-6} m^2/s$ . Os valores encontrados utilizando o Método Numérico para a profundidade de 0,4 metro ficou entre  $1,2 \times 10^{-6}$  e  $1,5 \times 10^{-6}$ .

Na análise dos dados pelo Método Numérico, foi possível detectar a influência da umidade na difusividade térmica do solo. Conforme estudos apresentados nesta tese, seção 2.3.2, a maior concentração de umidade em solos com as mesmas características do que foram analisadas ocorre logo abaixo da superfície, em torno de 0,2 metro de profundidade, mesmo

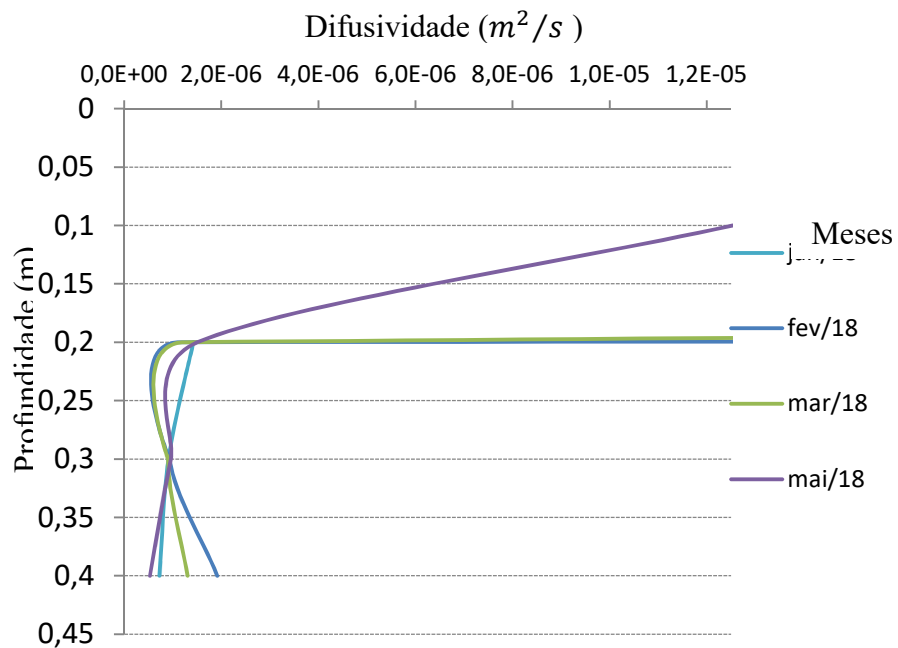
no período seco ou chuvoso. A Figura 27 mostra o aumento da difusividade que ocorre na profundidade de 0,2 metros, detectado em todos os períodos de análise, variando apenas na intensidade em função do maior ou menor grau de umidade no solo.

Figura 20 – Método da Amplitude - AMP1



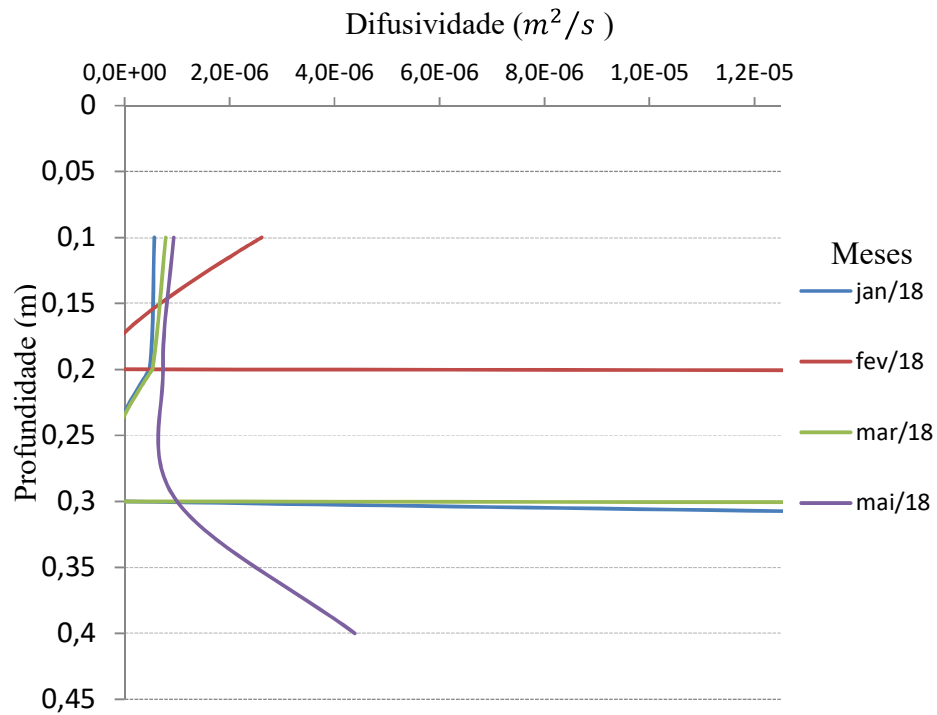
Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

Figura 21 – Método do Arcotangente - AMP2



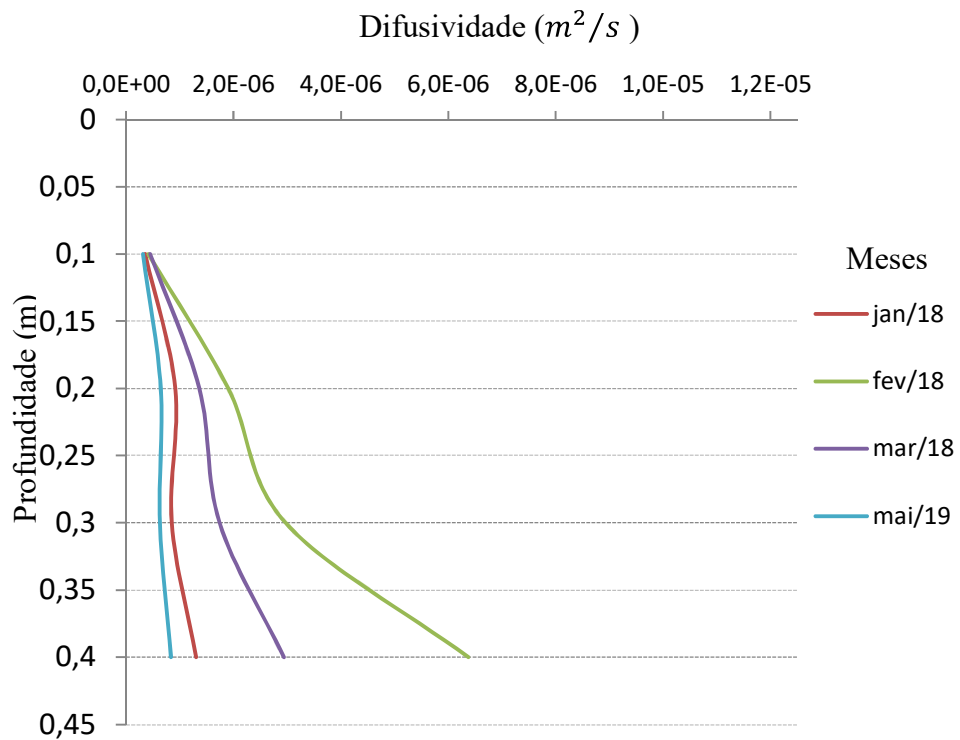
Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

Figura 22 – Método da Fase Direta - PHA1



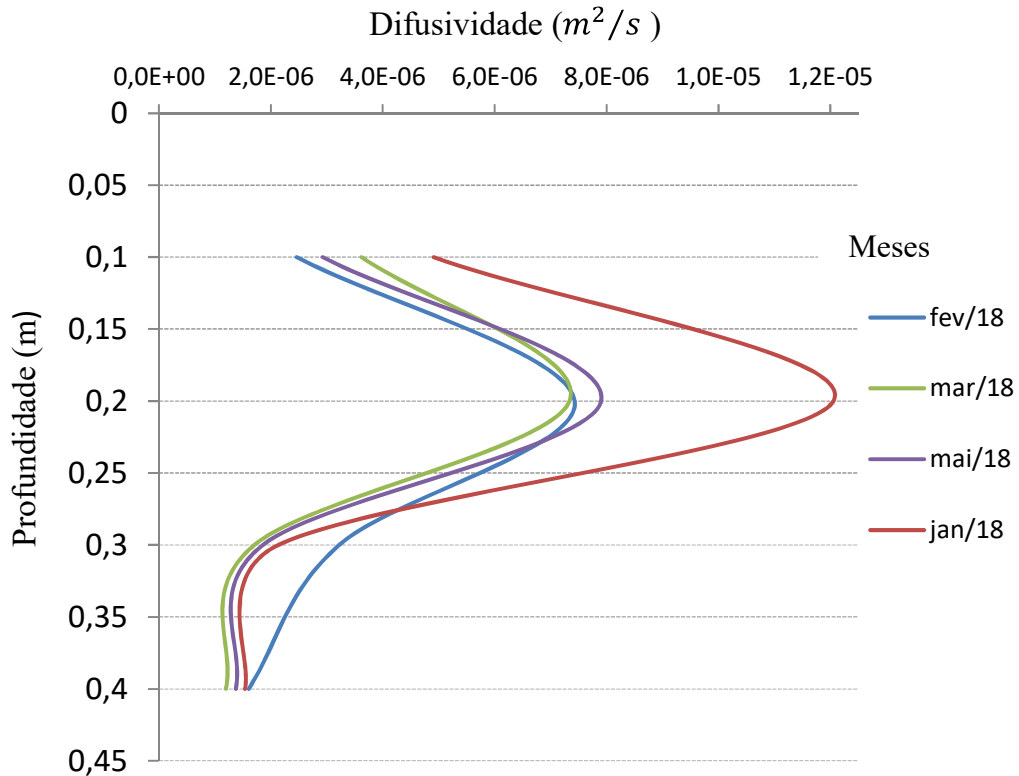
Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

Figura 23 – Método do Logaritmo - PHA2



Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

Figura 24 – Métodos Numéricos de Diferenças Finitas –NUM



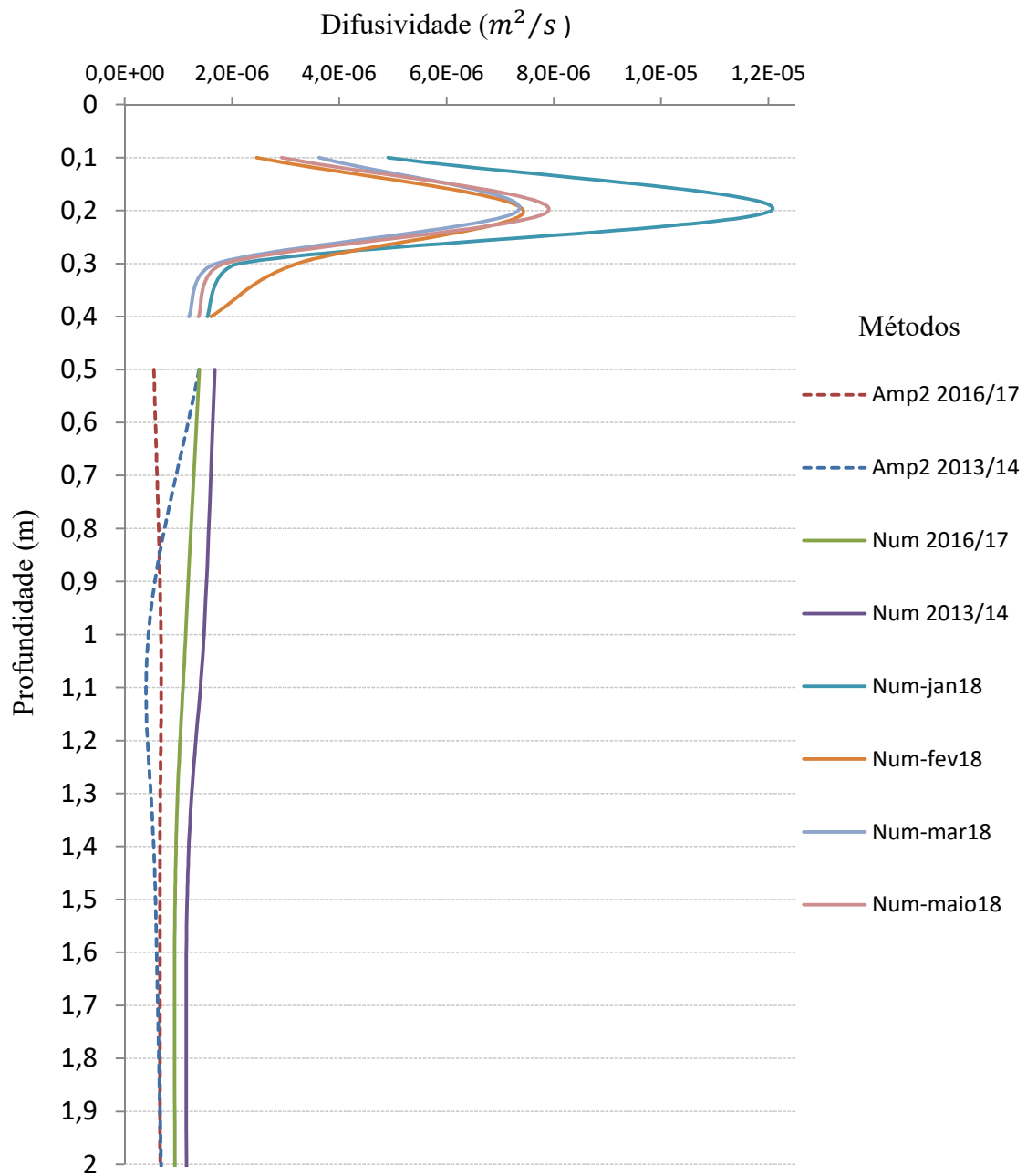
Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

### 5.2.3 Comparação entre os valores obtidos nos ciclos diário e anual

Se tomarmos os valores estimados de difusividade térmica aparente do solo na região mais superficial, até 0,4 metro de profundidade, utilizando os ciclos diários de variação de temperatura e compararmos com os valores de difusividade encontrado nas regiões mais profundas, de 0,5 até 5 metros de profundidade, utilizando os ciclos anuais, podemos verificar que os valores convergem na profundidade de 0,4 e 0,5 metro, conforme mostrado na Figura 28.

Na profundidade de 0,2 metro é possível constatar a influência da umidade na difusividade térmica do solo. Conforme demonstrado na seção 2.3.2, onde afirma que estudos demonstram que nesta região se concentra a maior quantidade de água no solo com essas características, aumentando rapidamente o valor da difusividade e retornando logo abaixo a um valor próximo ao inicial.

Figura 25 – Resultado da difusividade em ciclos anuais e diários



Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

### 5.3 ENERGIA TROCADA NO SISTEMA GEOTÉRMICO

Para o levantamento preliminar dos dados práticos sobre a capacidade de troca térmica do solo foi realizado um experimento conforme descrito no início do capítulo 4. Conectaram-se os trocadores enterrados no solo com a placa de aquecimento solar no telhado das salas de

teste do projeto geotérmico juntamente com uma bomba de água e sensores de temperatura e de fluxo de água. O experimento foi realizado no período de 12 de setembro a 16 de dezembro de 2015. Os dias escolhidos para análise foram aqueles que apresentaram temperaturas mais elevadas buscando analisar o desempenho no maior tempo possível durante o dia. A medição ocorreu de forma contínua durante as 24 horas do dia, com grandes variações na amplitude térmica durante o período de medições. A velocidade de vazão do fluido foi constante. O controle atuou no acionamento da bomba d'água para que o interior da placa coletora solar atingisse a temperatura de 45 °C e acontecesse o desligamento da bomba quando a temperatura atingisse 35 °C. Nas figuras 30, 31 e 32 é possível perceber graficamente, quando a temperatura no interior da placa atinge um desses pontos, pois ocorre uma variação súbita dos valores das temperaturas. Tal variação se deve ao acionamento da bomba e circulação da água vinda dos trocadores geotérmicos ou pela interrupção da circulação da mesma. O mesmo ocorre com os valores medidos pelos sensores de temperatura do fluido na entrada e na saída dos trocadores geotérmicos. Durante a circulação do fluido, quando a bomba está acionada, ocorre uma maior diferença entre ambas devido ao calor absorvido pelo solo.

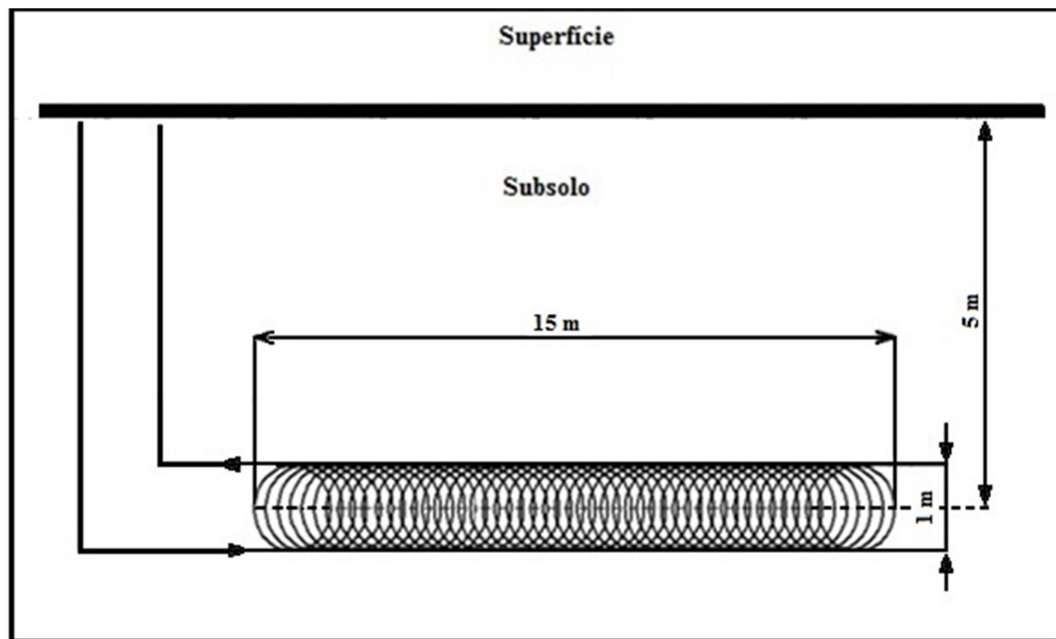
Outros pontos de variações bruscas de temperatura que ocorrem no interior do painel coletor como podem ser vistas na Figura 31, são devidos à presença de nuvens no céu que limitam ou impedem a incidência solar.

Foram analisadas as medições do sistema geotérmico em funcionamento com o objetivo de verificar a quantidade de energia que o trocador geotérmico instalado é capaz de transferir para o solo. O trocador geotérmico é composto por uma mangueira de 25 mm de diâmetro, com paredes de 2,5 mm de espessura e 100 metros de comprimento, instalado em uma área de solo de 15 m<sup>2</sup>, enterrado a uma profundidade de 5 metros, conforme ilustra a Figura 29.

Nos experimentos realizados, a energia geotérmica atuou dissipando o calor produzido pela placa de coletor solar com uma vazão média do fluido de 4,35 litros por minuto. Calculou-se então a média das temperaturas de entrada e saída e obteve-se a diferença de temperaturas nesse período. A bomba de água que aciona o sistema possui tensão de operação de 9 Vcc, corrente de 3,8 A, tendo assim um consumo de 34,2 Wh.

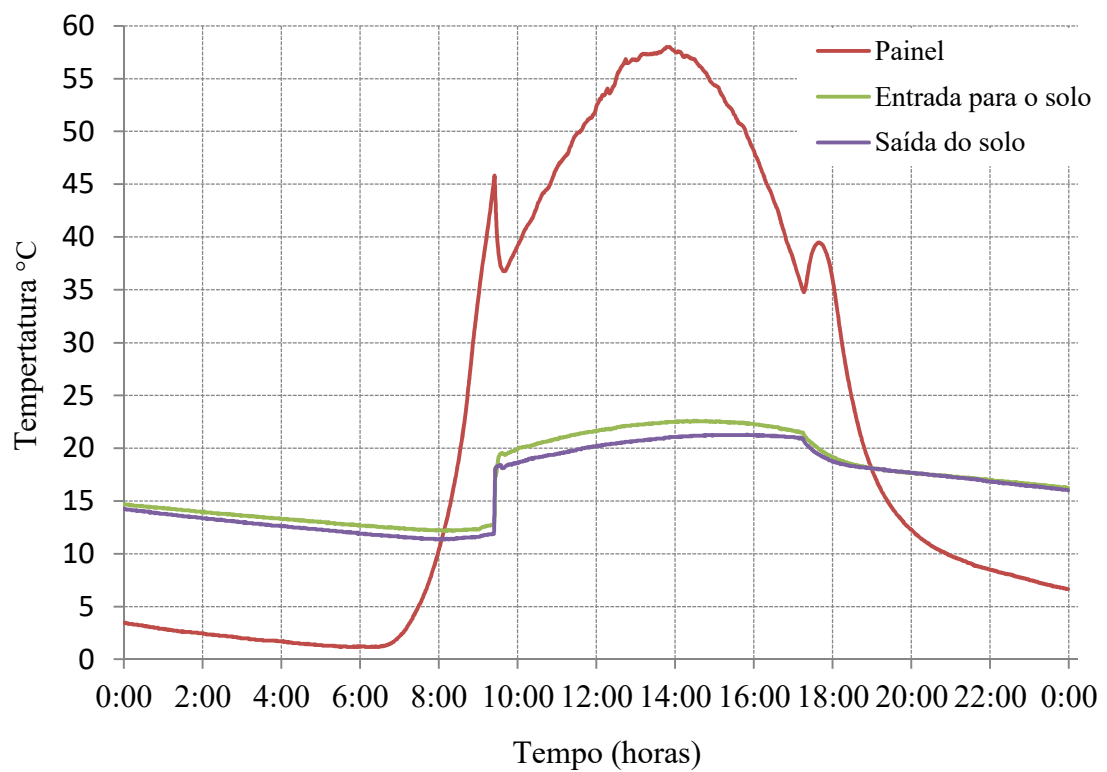
Os dados foram levantados no período de funcionamento: das 09h26min até às 17h16 num total de 7h50min. A diferença média entre as temperaturas de entrada e saída de água no trocador geotérmico foi obtida pela subtração das temperaturas médias de entrada e de saída a partir da equação 5.1

Figura 26 – Trocadores de calor geotérmicos



Fonte: Elaborada pelo Autor (2014).

Figura 27 – Resultados do dia 13/09/2015



Fonte: Elaborada pelo Autor (2016).



$$\Delta T = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx - \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} g(x) dx \quad (5.1)$$

onde:

$t_1$ : 09h26min;

$t_2$ : 17h16min

$f$ : temperaturas de entrada da água no GHX;

$g$ : temperaturas de saída da água no GHX;

$\tau$ : período.

A quantidade de energia permutada no trocador de calor pode ser calculada aproximadamente pela equação

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta t \quad (5.2)$$

onde:

$\dot{Q}$ : Fluxo de calor trocado (J/s)

$\Delta t$ : Dif. de temperatura de entrada e saída na mangueira (°C)

$\dot{m}$ : Fluxo mássico (g/s)

Com esta equação obtém-se:

$\dot{m}$ : 4,35 litros/min ou 72,5 g/s.

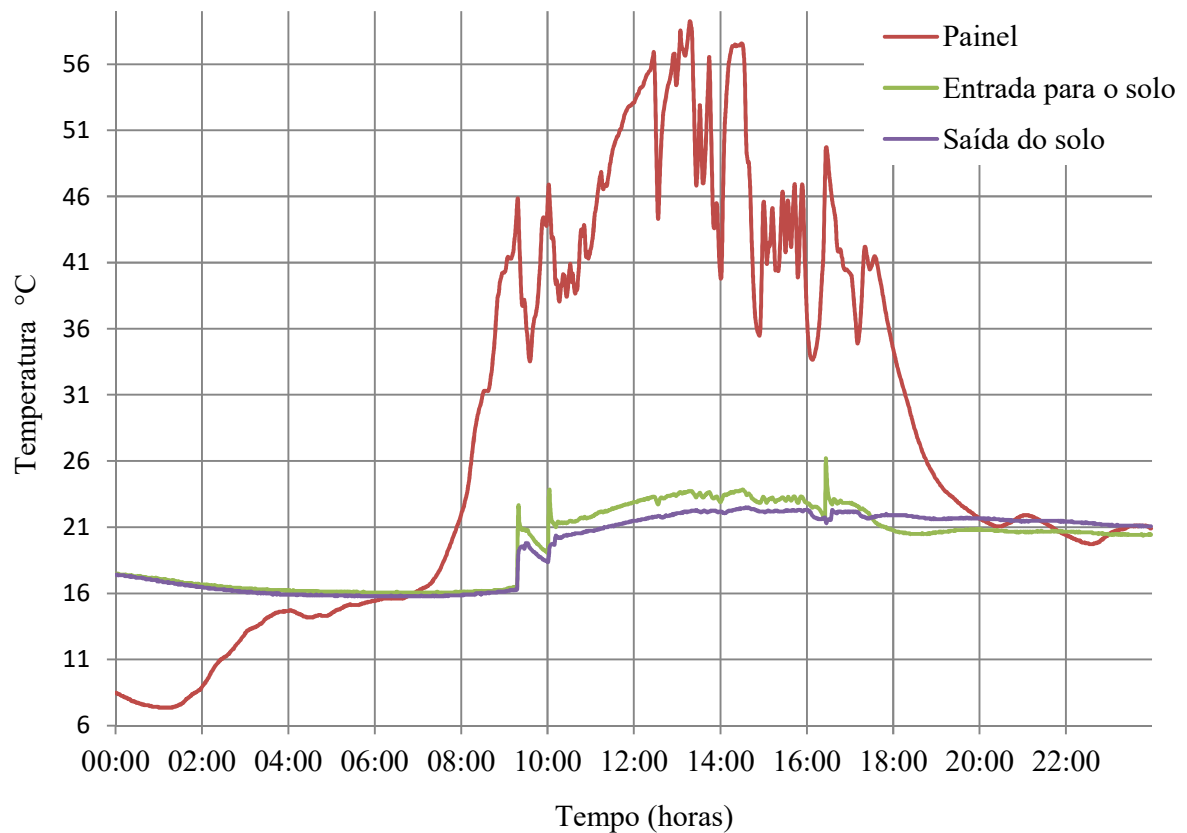
C: Calor específico da água = 4,18J/g °C

$$\Delta T = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx - \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} g(x) dx = 21,65 - 20,39 = 1,26 \text{ °C}$$

$$\dot{Q} = 381,84 \text{ J/s}$$

A Figura 31 mostra a variação que ocorreu na temperatura interna da placa solar durante dia em que ocorreu o experimento, devido a presença de nuvens que bloquearam a radiação solar.

Figura 28 – Resultado do dia 15/09/2015



Fonte: Elaborada pelo Autor (2015).

Período de funcionamento: 09h19min até às 17h22min = 8h4min

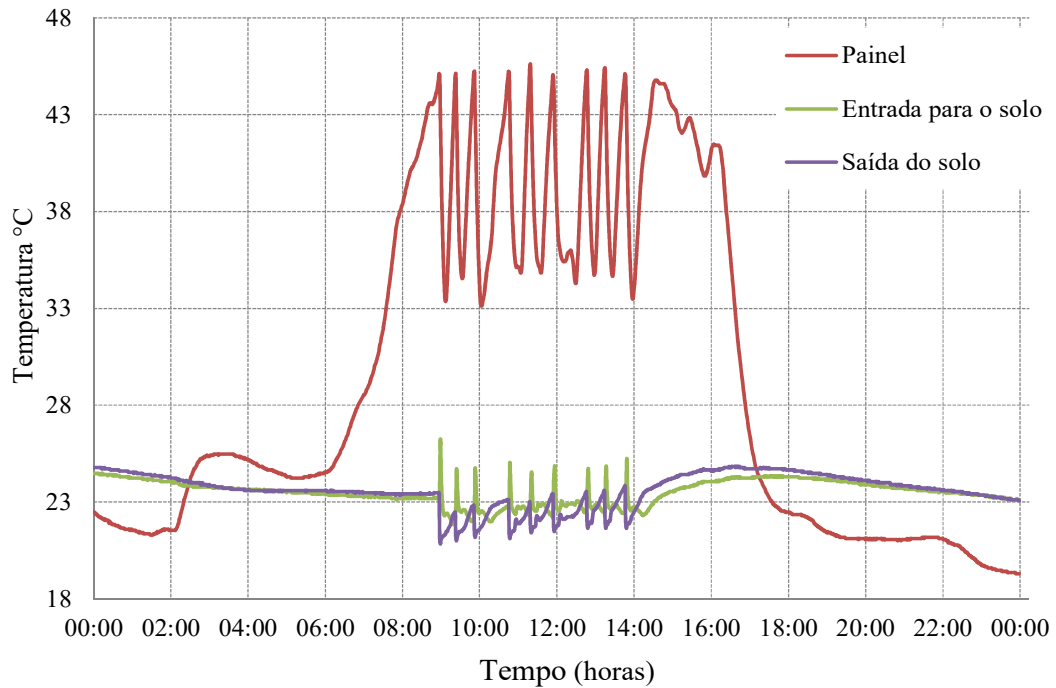
$$\Delta T = 22,59 - 21,46 = 1,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = 340,29 \text{ J/s}$$

A energia dissipada pelos trocadores geotérmicos nesse intervalo de tempo foi de **2,739 kWh**.

No dia 30/10/2015, representado pela figura 32 ocorreram várias interrupções na circulação de água pelo trocador geotérmico devido à baixa intensidade da radiação solar daquele dia.

Figura 29 – Resultado do dia 30/10/2015



Fonte: Elaborada pelo Autor (2016).

$$\Delta T = 23,05 - 21,90 = 1,149 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{Q} = 348,20 \text{ J/s}$$

A energia dissipada pelos trocadores geotérmicos nesse intervalo de tempo foi equivalente a  $E = 0,8 \text{ kWh}$ . O resultado do desempenho do sistema geotérmico durante o período de análise pode ser visto no quadro 8.

Quadro 8 – Resultados obtidos no experimento

Data	Fluxo de Calor (J/s)	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tempo de atuação (h)	Energia Dissip. kWh
13/09/2015	381,84	21,65 - 20,39 = 1,26	7,82	2,986
14/09/2015	392,75	22,33 - 21,03 = 1,29	8,06	3,165
15/09/2015	340,29	22,59 - 21,46 = 1,12	8,05	2,739
30/09/2015	324,74	22,31 - 21,32 = 1,07	7,53	2,445
16/10/2015	424,85	22,701 - 21,29 = 1,40	8,05	3,420
30/10/2015	348,2	23,05 - 21,90 = 1,14	2,86	0,996
15/11/2015	337,00	24,03 - 22,92 = 1,11	7,4	2,493
30/11/2015	347,56	24,644 - 23,49 = 1,14	7,09	2,464
16/12/2015	298,49	25,93 - 24,95 = 0,98	7,83	2,337

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

### 5.3.1 Densidade de Fluxo de calor

Como visto na seção 3.4.2 a troca de calor com o subsolo utilizando uma tubulação cilíndrica envolve duas trocas por condução (no solo e na parede da mangueira) e uma troca por convecção na água, ocorrendo de forma subseqüentes. Com os resultados do experimento é possível determinar a densidade de fluxo de calor no trocador geotérmico que é dada por

$$k = \frac{\dot{Q}}{A\Delta t} \quad (5.3)$$

onde:

A: Área da superfície do trocador geotérmico ( $m^2$ )

Assim,

$$k = \frac{\dot{Q}}{l2\pi r\Delta} \quad (5.4)$$

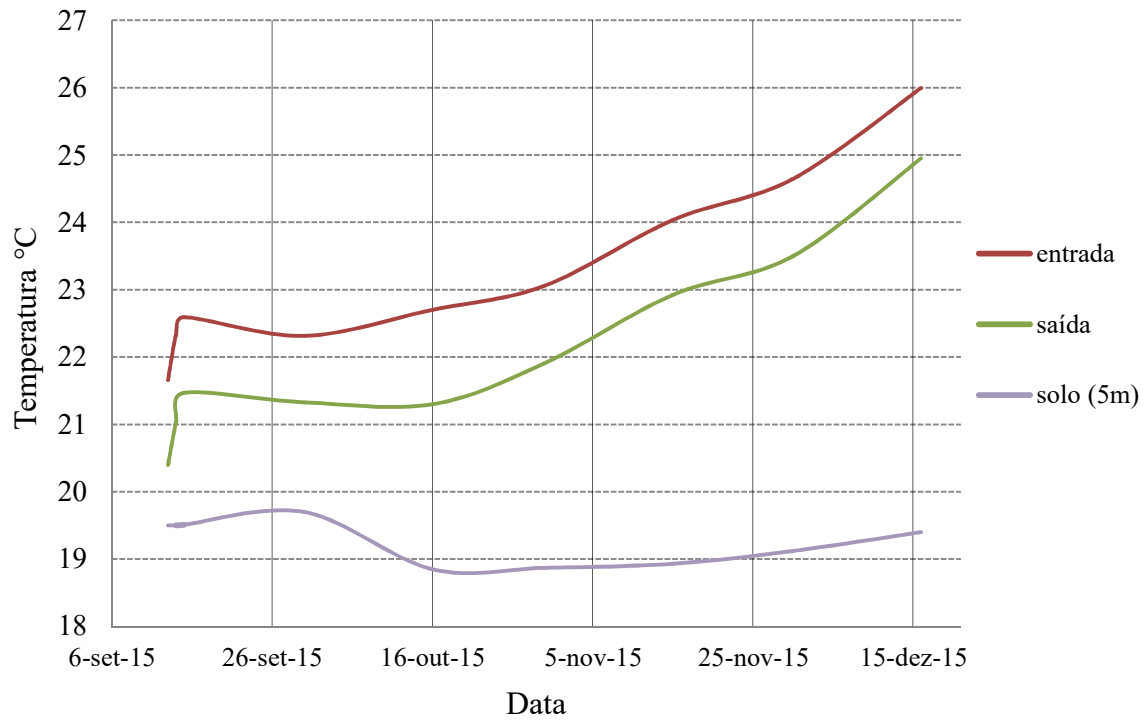
$$k = 37,9 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$$

### 5.3.2 Aumento da temperatura do solo no entorno do trocador geotérmico

Conforme o trocador geotérmico dissipava calor no solo, a temperatura no seu entorno aumentava. Um sensor de temperatura distante do trocador, também instalado a 5 metros de profundidade foi usado como referência. Mesmo com o aumento da temperatura no entorno, ficou praticamente constante a diferença de temperatura entre a entrada e saída da água, como pode ser visto na Figura 33.

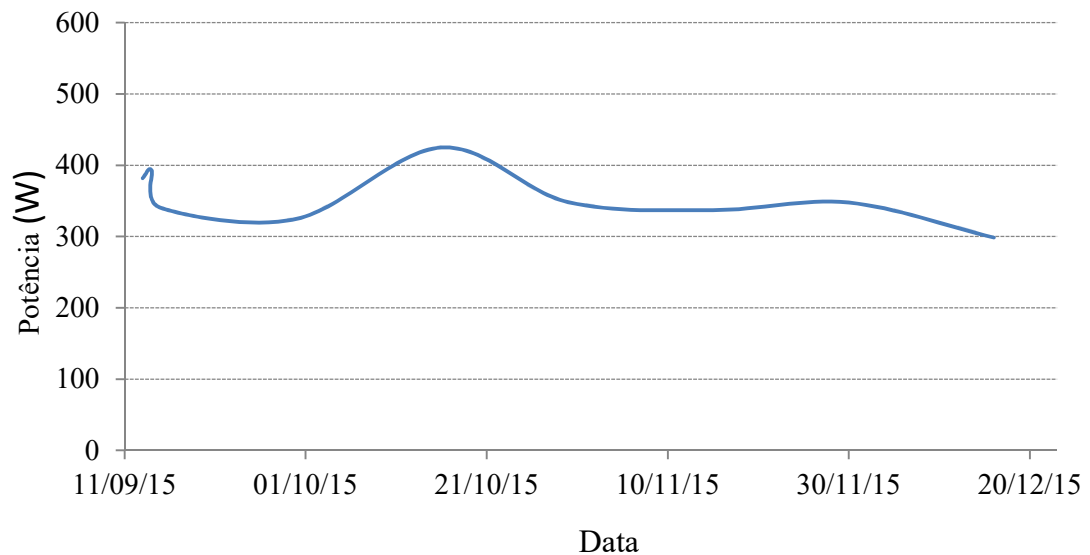
Na Figura 34 é mostrado que a potencia média dissipada pelo trocador se mantém constante durante todo o período de realização

Figura 30 – Temperaturas do solo e da entrada e saída da água do trocador geotérmico



Fonte: Elaborada pelo Autor (2016)

Figura 31 – Potência média dissipada pelo trocador geotérmico - 5 metros



Fonte: Elaborada pelo Autor (2016).

A potência dissipada pelo trocador no solo durante a realização do experimento variou entre 337 e 424,85 W nas médias diárias, sendo que a potencia média durante o período ficou em 355,08 W.

No experimento com o trocador geotérmico observamos que independente do tempo de atuação do trocador, uma ou oito horas durante o dia, o fluxo de calor se manteve constante como visto no Quadro 6. Em dias de maior calor, a diferença de temperatura do fluido de entrada e de saída tende a ser maior e com isso aumentando a potência dissipada do trocador no solo. Essa potência dissipada é acumulada no interior do solo e faz com que a temperatura ao seu redor aumente com o passar do tempo. Desta forma a temperatura do fluido que percorre o trocador geotérmico também aumenta.

Quando ocorreu o aumento da temperatura no interior do solo, como visto na Figura 33, a troca térmica continuou ocorrendo com a mesma intensidade, pois a diferença de temperatura do fluido de entrada e de saída permaneceu na mesma faixa dos valores obtidos no início do experimento. Os resultados indicam que é possível fazer trocas térmicas com o subsolo de maneira bastante simples e que esta energia pode ser usada para ajudar na climatização de ambientes, deixando-os dentro da zona de conforto térmico com um reduzido consumo de energia elétrica. Os valores obtidos experimentalmente demonstraram que o trocador de calor instalado em uma área de 15 metros quadrados, na profundidade de 5 metros, formada por uma mangueira polietileno de alta densidade (PEAD) de 100 metros teve uma densidade de fluxo de calor no valor de  **$37,9 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$** . A área total do trocador geotérmico é  $8,01\text{m}^2$ . A potência média dissipada pelo trocador no solo durante a realização do experimento foi de 355,08 W, sendo que o potencia elétrica consumida pela bomba hidráulica, mostrada no ANEXO D, que movimenta o fluido foi de 34,2 W.

## 6 CONCLUSÃO

A instrumentação eletrônica usada para aquisição dos dados de distribuição geotérmica das temperaturas para esta tese funcionou conforme o esperado. A configuração escolhida para as duas hastes usadas na medição de ciclos anuais e diários de temperatura que ocorreram no solo bem como a metodologia utilizada no armazenamento e no processamento dos dados demonstraram resultados compatíveis.

Para as medições realizadas no levantamento da dissipação de calor no solo a instrumentação eletrônica instalada também funcionou de forma adequada. Os valores das temperaturas medidas no solo até a profundidade de 5 metros, nos períodos de set/2013 a ago/2014 e de out/2016 a set/2017, mostraram um comportamento coerente da temperatura no solo que diminui de amplitude conforme se aumentava a profundidade.

Os valores de temperatura em todo o perfil vertical do solo estudado oscilaram sempre em torno da temperatura média local, que no caso de Santa Maria - RS, é atualmente de 19,5 °C. Outro ponto que se observa é que a máxima temperatura em cada profundidade ocorreu sempre com uma defasagem de tempo, mostrando que o fluxo de calor no solo se desloca lentamente. Baseado nessas características foi possível determinar a difusividade térmica aparente do perfil vertical do solo.

Para as conclusões desta tese foram testados diferentes métodos matemáticos para a determinação in loco das características térmicas do solo. Na análise dos ciclos diários que foram realizados no período de janeiro a maio de 2018 na profundidade superficial até 0,5 metro também foram detectadas as mesmas características de atenuação e defasagem entre as camadas mensuradas. Os valores estimados de difusividade térmica pelo Método Numérico aplicado a ciclos diários na profundidade final de 0,4 metro, no período de janeiro a maio de 2018, são muito próximos dos valores de difusividade obtidos nos ciclos anuais, em uma profundidade inicial de 0,5 metros, nos períodos 2013/14 e 2016/17 utilizando os métodos NUM e AMP2. Estes resultados demonstram que é possível estimar-se a difusividade térmica do solo com apenas alguns ciclos diários na condição de que os dados analisados sejam de dias ensolarados, sem nuvens e com a umidade do solo não saturada. Para tanto, necessita-se um longo período para fazer o levantamento.

Com a instrumentação eletrônica desenvolvida para esta tese foi possível coletar dados geotérmicos de forma sistemática, continuada e em pequenos intervalos de tempo, o que permitiu que fosse possível utilizar métodos mais complexos de análise matemática. Os valores obtidos nos ciclos anuais com os métodos da Amplitude - AMP1 e do Logaritmo -

PHA2 apresentaram incoerências e foram desconsiderados. O método da Fase Direta - PHA1 teve seus valores de difusividade oscilando entre  $2,0 \cdot 10^{-7}$  e  $6,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

O Método Numérico de Diferenças Finitas - NUM e do Arcotangente - AMP2 apresentaram uma grande estabilidade nos resultados com valores muito próximos nos dois ciclos anuais pesquisados, no entanto com tendências contrárias. Já no método Numérico, a difusividade do calor diminuiu de valor com o aumento da profundidade variando de  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  na profundidade de 0,5 metro até  $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  na profundidade de 4,5 metros. No método do Arcotangente a difusividade aumentou, tendo variado de  $5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  na profundidade de 0,5 metro até  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  na profundidade de 4,5 metros.

Na análise dos ciclos diários, os métodos do Arcotangente-AMP2 e Logaritmo-PHA2 tiveram desempenho superior aos métodos da Amplitude Direta-AMP1 e da Fase Direta - PHA1. Os métodos AMP2 e PHA2 realizam quatro pontos de análise durante um ciclo diário, com intervalos de 6 horas. Assim sendo, os valores estimados têm menor variação, visto que no ciclo diário é maior a dinâmica do calor na parte mais superficial do solo. Os métodos AMP1 e PHA1 consideraram apenas um ponto (ponto de maior amplitude e diferença de fase) em cada profundidade durante o ciclo diário, por isso são inadequados neste caso. O Método Numérico-NUM considera um ponto de estimativa a cada intervalo de tempo de coleta de dados, que no presente caso é de dois minutos.

Finalmente, com a caracterização térmica do solo obtida através da instrumentação eletrônica proposta e a aplicação de métodos matemáticos foram possíveis obter informações para dimensionar adequadamente trocadores geotérmicos tornando possível utilizar de uma forma mais eficiente toda energia geotérmica obtida diretamente do solo ou associada a um condicionador de ar. Experimentos que utilizam trocadores geotérmicos associados com aparelhos de ar condicionado estão sendo implantados e testados no laboratório do CEESP/UFSM conforme discutidos em De Nardin (2018).

## 6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições desta tese foram:

- Descrição completa do desenvolvimento, construção e instalação de uma sonda geotérmica multissensora para o monitoramento da temperatura do perfil vertical do subsolo;



- Apresentação detalhada da instalação e teste de um trocador geotérmico acoplado a uma placa de aquecimento solar;
- Descrição de um método de aquisição de dados geotérmicos para determinação da variação do comportamento térmico do solo, da superfície até a profundidade de 5 metros;
- Determinação da difusividade térmica aparente do solo em diversas camadas, aplicando métodos analíticos em ciclos diários de variação de temperatura, obtendo valores semelhantes ao encontrado em análise de ciclos anuais para profundidades equivalentes.
- Contribuição para a disseminação do conhecimento e desenvolvimento de tecnologias que visem facilitar o aproveitamento sustentável da energia geotérmica superficial para amenizar as distorções nas curvas de carga do setor energético.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Dimensionamento de uma planta geotérmica para climatização de uma habitação, visando o conforto térmico;
- Estudo de novas configurações para trocadores geotérmicos;
- Desenvolvimento de trocadores geotérmicos associados a aparelhos de ar condicionado, buscando a redução do consumo de energia elétrica;
- Pesquisa de novos dispositivos de controle eletrônico para a exploração e racionalização da energia geotérmica;
- Utilização dos resultados da pesquisa em outras áreas do conhecimento.

## BIBLIOGRAFIA

- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de energia elétrica**. 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 09 nov. 2018.
- ABEEólica. Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim anual de geração**. 2017. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2018.
- ABU-HAMDEH, N. H. **Thermal properties of soils as affected by density and water content**. *Biosystems Engineering*, v. 86, n. 1, p. 97-102, 2003. doi:10.1016/S1537-5110(03)00112-0
- ÁGUAS, M. P. **Conforto térmico: módulo da disciplina de mestrado “Métodos instrumentais em energia e ambiente”**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2000, 2001: 25.
- BANKS, D. **An introduction to thermogeology: Ground Source Heating and Cooling**. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2012. doi:10.1002/9781118447512
- BRANDL, H. **Energy foundations and other thermo-active ground structures**. *Geotechnique*, v. 56, n. 2, p. 81-122, 2006.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. Clarendon Press, 1960.
- CARSON, J. E. **Analysis of soil and air temperatures by fourier techniques**. *Res.* v. 68, p. 2217-2232, 1963. doi: 10.1029/JZ068i008p02217.
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Editora McGraw-Hill, São Paulo, Terceira Edição, p. 902, 2009.
- CHIASSON, A. D. **Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and Practice**. John Wiley & Sons, 2016.
- COLABONE, R O. **Determinação da difusividade térmica de um solo incorporado com resíduo de E.T.A.** 2002. 64 f. Dissertação (Mestrado em Física)–Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, SP, 2002.
- DE NARDIN, C. R. **Estudo comparativo entre o condicionamento de ar geotérmico e convencional e suas perspectivas para o sistema elétrico nacional**. 2015. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.
- DECICO, A. **Determinação das propriedades térmicas do solo em condições de campo**. Thesis of Livre-Docência, Escola Superior de Agricultura “Luis de Queirós”, Piracicaba, SP, Brasil, p. 78, 1974.
- DEVRIES, D. A. **Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media**. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 39, n. 5, p. 909-916, 1958.

DICKINSON, J.; BUIK, M.; SNIJDERS, A. **Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis**. *Géotechnique*, v. 59, n. 3, p. 249-260, 2009.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 1998. New York: John Wiley and Sons Inc, 1966.

DTI - Department of Trade and Industry - **Microgeneration Strategy and Low Carbon Building Programme: Consultation (2006)**

URL: <http://www.dti.gov.uk/energy/consultations/microgen.pdf>

DUARTE, A. P. L. **Avaliação de propriedades termo-hidráulicas de solos requeridas na aplicação da técnica de dessorção térmica**. 2004. 33 f. Tese (Doutorado Engenharia Civil)– Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

DUTRA, A. **Aproveitamento de fontes alternativas para redução do consumo de energia elétrica e reflexos nos seus custos**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2016: ano base 2015** - Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM ON RENEWABLE HEATING AND COOLING. **Common Vision for the Renewable Heating and Cooling Sector in Europe**. Brussels: European Technology Platform. 2011. doi:10.2788/20474

FAROUKI, O. T. **Thermal properties of soils**. United States: Trans Tech Pub., Rockport, MA, 1986. Print.

FERREIRA, S. J. F. et al. **Umidade e armazenamento de água em diferentes toposseqüências em floresta primária na Amazônia central**. Proceedings of the I Symposium of Water Resources, Cuiabá. 2007.

FLORIDES, G.; KALOGIROU, S. **Measurements of ground temperature at various depths**, Proceedings of the SET. 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies on CD-ROM, Nottingham, UK, 2004.

FUJII, H. et al. **An Improved Thermal Response Test for u-tube Ground Heat Exchanger Based on Optical Fiber Thermometers**. *Geothermics*, v. 38, p. 399-406, 2009. doi: 10.1016/j.geothermics.2009.06.002

FUJII, H. et al. **Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers**. *Geothermics*, v. 47, p. 61-68, 2013. doi: 10.1016/j.geothermics. 2013.02.006.

GEHLIN, S. **Thermal response test: method development and evaluation**. 2002. Tese de Doutorado. Luleå tekniska universitet. 2002.

GEIGER, R. **Manual de micro-meteorologia**. Calouste Gulbenkian. Lisboa. 1980.

HEUSINKVELD, B. G. et al. **Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 122, p. 21-37, 2004.

HEWITT, C. N.; JACKSON, A. V. **Atmospheric science for environmental scientists**. John Wiley & Sons, 2009.

HEWLETT, J. D. **Forests and floods in the light of recent investigation**. Proceedings of the Canadian Hydrology Symposium-Associate Committee on Hydrology, 1982.

HILLEL, D. **Soil Temperature and Heat Flow**. Environmental Soil Physics, London: Academic Press, 2. ed. p. 309-334, 1998.

HORTON, R.; WIERENGA, P. J.; NIELSEN, D. R. **Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near surface**. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 47, p. 25-32, 1983.

INMET. **Normais Climatológico do Brasil INMET**, 1981-2010. Disponível em: [www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas). Acesso em: 13 mai. 2018.

JACKSON, R. D.; KIRKHAM, D. **Method of measurement of the real thermal diffusivity of moist soil**. Soil Science Society of America Journal, v. 22, n. 6, p. 479-482, 1958.

JOHANSEN, O. **Thermal Conductivity of Soils**. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, 1977.

JOHNSTON, I. W.; NARSILIO, G. A.; COLLS, S. **Emerging geothermal energy technologies**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 15, n. 4, p. 643-653, 2011.

KIMBALL, B. A. et al. **Soil-heat flux determination: temperature gradient method with computed thermal conductivities**. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 40, p. 25-28, 1976.

LEE, K. S. **Underground Thermal Energy Storage**. Springer, London, 2013. p. 15-26.

LETTAU, B. **Determination of thermal diffusivity in the upper layers of a natural ground cover**. Soil Science, v. 112, p. 173-177, 1971.

LONGO, A. J. et al. **Instrumentation for surface seothermal data acquisition aiming at sustainable heat exchangers**. Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE, p. 2164-2138, 2014.

LUND, J. W. et al. **Characteristics, development and utilization of geothermal resources-a nordic perspective**. Episodes, v. 31, n. 1, p. 140-147, 2008.

MALEK, E. **Rapid changes of the surface soil heat flux and its effects on the estimation of evapotranspiration**. Journal of hydrology, v. 142, n. 1-4, p. 89-97, 1993.

MAYOCCHI, C. L.; BRISTOW, K. L. **Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements**. Agricultural and forest meteorology, v. 75, n. 1-3, p. 43-50, 1995.

MENENTI, M. **Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques**. 1984. Tese de Doutorado. [sn].

MORADI, A. et al. **Heat transfer in unsaturated soil with application to borehole thermal energy storage.** *Vadose Zone Journal*, v. 15, n. 10, 2016.

ODPM - Office of the Deputy Prime Minister - **Annual Report and Accounts 2005 for 2006**  
Published by authority of the House of Commons London. 2006

OLIVEIRA JÚNIOR, A. A. M. **Caracterização das propriedades termo-hidráulicas de materiais artificiais para reaterro de cabos elétricos de potência.** 1993. 343 p. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1993.

OMER, A. M. **Ground-source heat pumps systems and applications.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 2, p. 344-371, 2008. doi:10.1016/j.rser.2006.10.003

PENROD, E.; WALTON, W.; TERRELL, D. A. **Method to describe soil temperature variation.** *J. Soil Mech. Found. Div.*, v. 84, p. 1-21, 1958.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Salesward-Discovery, Curitiba, 446 p. 1996.

RAFFERTY, K. **Ground water issues in geothermal heat pump systems.** *Ground Water*, v. 41, n. 4, p. 408, 2003.

REES, S. W. et al. **Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 4, n. 3, p. 213-265, 2000. doi:10.1016/S1364-0321(99)00018-0

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** São Paulo: Manole, 2004.

REICHERT, J. M. et al. **Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, Viçosa, v. 16, p. 289-298, 1992.

RETSCREEN® INTERNATIONAL. **Clean energy project analysis.** 3rd edition, RETScreen® Engineering & Cases Textbook, Natural Resources Canada. 2004.

RICHTMYER, R. D.; MORTON, K. W. **Difference methods for initial-value problems.** Malabar, Fla.: Krieger Publishing Co., c1994, 2nd ed., 1994.

RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V. Water infiltration and time to recharge the profile of three soils Rio Grande do Sul, Brazil. **Agricultural Sciences**, v. 4, n. 11A, p. 12, 2013.

SANNER, B. Shallow geothermal energy. **GHC Bulletin**, v. 19, jun. 2001.

SANNER, B. et al. **Thermal response test–current status and world-wide application.** *Proceedings world geothermal congress.* International Geothermal Association, 2005. p. 24-29.

SANTOS, R. C. **Propriedades térmicas do solo: um estudo de casos.** 1987. 133 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São José dos Campos, 1987.

SCHÖFFEL, E. R.; MENDES, M. E. G. **Influência da cobertura sobre o perfil vertical de temperatura do solo.** Anais do XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Piracicaba, São Paulo, 2005.

SELF, S.; REDDY, B.; ROSEN, M. **Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options.** Applied Energy, v. 101, p. 341-348, 2013.  
doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.048

SEPASKHAH, A. R.; BOERSMA, L. **Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content.** Soil Science Society of America Journal, v. 43, n. 3, p. 439-444, 1979.

SINGH, D. N.; DEVID, K. **Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 22, n. 3-4, p. 133-143, 2000.

SOBRINHO, T. A. et al. **Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

SOUZA, C. F. et al. **Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2002.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.** Springer Science & Business Media, 2012.

THE EUROPEAN PARLIAMENT. **Diretiva Comunitária 2002/91/CE sobre o desempenho energético das edificações.** 2003.

THORNE, A. **Renewable energy sources for buildings.** CIBSE Report TM38: 2006. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.

TINTI, F., BRUNO, R., & FOCACCIA, S. (2015). **Thermal response test for shallow geothermal applications: a probabilistic analysis approach.** *Geothermal Energy*, 3(1), 6..

VIEIRA, A.; MARANHA, J. **Estudo de modelação numérica do comportamento de estruturas termoactivas.** Anais do 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa. 2009.

WANG, J.; BRAS, R. L. **Ground heat flux estimated from surface soil temperature.** Journal of hydrology, v. 216, n. 3-4, p. 214-226, 1999.

YUAN, Y. et al. **Semi-analytical solution for steady-periodic heat transfer of attached underground engineering envelope.** Building and Environment, v. 43, n. 6, p. 1147-1152, 2008.

## APÊNDICE

## APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO UTILIZADA PARA O CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE APARENTE DO SOLO

```

%% Carregar dados do excel:
% --> Definição das alturas onde os dados foram coletados:
Alturas = [0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0]; % Alturas em m, onde 0.0m corresponde à
superfície.
% Qtde. de alturas onde as medições foram feitas.
% -> Carregar dados experimentais:
% Substituir NaN --> '0':
% Definição do vetor de tempo que corresponde à coleta dos dados:
% Vetor de tempo em dias!
% Quantidade de medições feitas (uma medição diária).
% *** Interpolação: 'linear', 'nearest', 'next', 'previous', 'pchip',
% 'cubic', 'v5cubic', 'spline':
%% Valores médios:
% para a SUPERFÍCIE (altura = 0.0 m):
%% Plot das medias:
% Alturas a serem estudadas (06 alturas, onde a altura 1 corresponde à superfície!):
VetorAlturas1 = 0; % [0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0]
VetorAlturas2 = 4.5; % Altura(s) em m (índice(s) NÃO!)
% Inicialização de vetores:
% -----
% Método 1 dado pela Difusividade
Tmax_Z1 = max(Matriz_medias(:, IdxZ1));
Tmax_Z2 = max(Matriz_medias(:, IdxZ2));

% Determinação da difusividade aparente nas alturas {i, j}:
D_amp1(i, j) = (omega / 2) .* ...
((Alturas(IdxZ2) - Alturas(IdxZ1)) / ...
(log(Tmax_Z1/Tmax_Z2))).^2;

% Determinação da função de temperatura nas alturas {i, j}:
Funcoes_Temperatura(i, j).T_A1 = Tinf + T0 .* (...
exp(-Altura .* sqrt(omega / (2 * D_amp1(i, j)))) .* ...
sin(omega .* t_Segundos + phi - ...
Altura .* sqrt(omega / (2 * D_amp1(i, j)))));
% -----

% Método 2 dado pela Difusividade:
X = ((Matriz_medias(IdxT1, IdxZ1) - Matriz_medias(IdxT3, IdxZ1)) * ...

```



```

(Matriz_medias(IdxT2, IdxZ2) - Matriz_medias(IdxT4, IdxZ2)) - ...
(Matriz_medias(IdxT2, IdxZ1) - Matriz_medias(IdxT4, IdxZ1)) * ...
(Matriz_medias(IdxT1, IdxZ2) - Matriz_medias(IdxT3, IdxZ2))) / ...
((Matriz_medias(IdxT1, IdxZ1) - Matriz_medias(IdxT3, IdxZ1)) * ...
% Determinação da difusividade aparente nas alturas {i, j}:
D_amp2(i, j) = (omega / 2) .* ...
((Alturas(IdxZ2) - Alturas(IdxZ1)) / atan(X)).^2;

% Determinação da função de temperatura nas alturas {i, j}:
Funcoes_Temperatura(i, j).T_A2 = Tinf + T0 .* (...
exp(-Altura .* sqrt(omega / (2 * D_amp2(i, j)))) .* ...
sin(omega .* t_Segundos + phi - ...
Altura .* sqrt(omega / (2 * D_amp2(i, j)))));

% -> Determinação dos tempos em que aconteceram as máximas
% temperaturas, nas duas alturas:
[ TMax_Z1, IdxTMax_Z1 ] = max(Matriz_medias(:, IdxZ1));
[ TMax_Z2, IdxTMax_Z2 ] = max(Matriz_medias(:, IdxZ2));
t_TMax_Z1 = t_Segundos(IdxTMax_Z1);
t_TMax_Z2 = t_Segundos(IdxTMax_Z2);

% Determinação da difusividade aparente nas alturas {i, j}:
D_phi1(i, j) = (1 / (2 * omega)) .* ...
((Alturas(IdxZ2) - Alturas(IdxZ1)) ./ ...
(t_TMax_Z2 - t_TMax_Z1)).^2;
% Determinação da função de temperatura nas alturas {i, j}:
Funcoes_Temperatura(i, j).T_P1 = Tinf + T0 .* (...
exp(-Altura .* sqrt(omega / (2 * D_phi1(i, j)))) .* ...
sin(omega .* t_Segundos + phi - ...
Altura .* sqrt(omega / (2 * D_phi1(i, j)))));

% MÓDULO 4:
Y = ((Matriz_medias(IdxT1, IdxZ1) - Matriz_medias(IdxT3, IdxZ1)).^2 + ...
(Matriz_medias(IdxT2, IdxZ1) - Matriz_medias(IdxT4, IdxZ1)).^2) / ...
((Matriz_medias(IdxT1, IdxZ2) - Matriz_medias(IdxT3, IdxZ2)).^2 + ...
(Matriz_medias(IdxT2, IdxZ2) - Matriz_medias(IdxT4, IdxZ2)).^2);
% Determinação da difusividade aparente nas alturas {i, j}:
% (Equação --):
% D_phi2(i, j) = (1 / (2 * omega)) .* ...
% ((Alturas(IdxZ2) - Alturas(IdxZ1)) ./ ...

```

```

% ((1 / (2 * omega)) * log(Y)).^2;

% Determina o coeficiente da difusividade aparente nas alturas {i, j}:
D_pha2(i, j) = (0.0121 .* ...
(Alturas(IdxZ2) - Alturas(IdxZ1)) ./ (log(Y))).^2;
% Determina o coeficiente da função de temperatura nas alturas {i, j}:
Funcoes_Temperatura(i, j).T_P2 = Tinf + T0 .* (...
exp(-Altura .* sqrt(omega / (2 * D_pha2(i, j)))) .* ...
sin(omega .* t_Segundos + phi - ...
Altura .* sqrt(omega / (2 * D_pha2(i, j)))));
% -----

% Másculo 5 :
% --> Obter Delta_t e Delta_z:
Delta_t = t_Segundos(1);
Delta_z = Alturas(IdxZ2) - Alturas(IdxZ1);
% --> Determinação da difusividade aparente nas alturas {i, j}:
D_num_aux = zeros(1, QtdeMedicoes - 1);
for k = 1 : (QtdeMedicoes - 1)
    alfa = (Delta_z.^2 / Delta_t) .* ...
((Matriz_medias(k + 1, IdxZ2) - ...
Matriz_medias(k, IdxZ2)) ./ ...
(Matriz_medias(k, IdxZ3) - ...
(2 * Matriz_medias(k, IdxZ2)) + ...
Matriz_medias(k, IdxZ1)));
    if(alfa < ((Delta_z.^2)/(2 * Delta_t)))
        D_num_aux(k) = alfa;
    end
D_num(i, j) = mean(D_num_aux);
% --> Determina o coeficiente da função de temperatura nas alturas {i, j}:
Funcoes_Temperatura(i, j).T_N = Tinf + T0 .* (...
exp(-Altura .* sqrt(omega / (2 * D_num(i, j)))) .* ...
sin(omega .* t_Segundos + phi - ...
Altura .* sqrt(omega / (2 * D_num(i, j)))));

end

%% Figuras/Saída:
% fprintf('D_amp1: %2.2f\n', D_amp1);
% fprintf('D_amp2: %2.2f\n', D_amp2);
% fprintf('D_pha1: %2.2f\n', D_pha1);

```

```

% fprintf('D_pha2: %2.2f,\n', D_pha2);
% fprintf('D_num: %2.2f,\n', D_num);
IdxAltura = 1;
c = 1;
figure()
for i = 1 : numel(VetorAlturas1)
for j = 1 : numel(VetorAlturas2)
subplot(numel(VetorAlturas1), numel(VetorAlturas2), c);
if(VetorAlturas1(i) == VetorAlturas2(j))
% Dummy plot:
plot(t_Dias, t_Dias, 'Color', [1, 1, 1]);box on;
% Write 'f_i' in the main diagonal:
text(0.45, 0.5, sprintf('Z=%2.1f m', VetorAlturas1(i)), ...
'fontsize', 12, 'fontweight', 'bold', ...
'units', 'normalized');
else
h1 = plot(t_Dias, Matriz_medias(:, IdxAltura), 'k', 'LineWidth', 1.5);hold on;
h2 = plot(t_Dias, Funcoes_Temperatura(i, j).T_A1, 'LineWidth', 1.25);hold on;
h3 = plot(t_Dias, Funcoes_Temperatura(i, j).T_A2, '-.', 'LineWidth', 1.5);hold on;
h4 = plot(t_Dias, Funcoes_Temperatura(i, j).T_P1, 'LineWidth', 1.25);hold on;
h5 = plot(t_Dias, Funcoes_Temperatura(i, j).T_P2, '-.', 'LineWidth', 1.5);hold on;
h6 = plot(t_Dias, real(Funcoes_Temperatura(i, j).T_N), 'LineWidth', 1.5);hold on;grid on;
end
c = c + 1;
if(i == 1)
title(sprintf('Z=%2.1f m', VetorAlturas2(j)));
end
if(j == 1)
ylabel('Temperatura [^oC]');
end
if(i == numel(VetorAlturas1))
xlabel('Tempo [Dias]');
end
h = legend([ h1; h2; h3; h4; h5; h6 ], 'M', 'A1', 'A2', 'P1', 'P2', ...
'N', 'Orientation', 'Horizontal', 'Location', [0.48 0.025 0.1 0.001]);
set(h, 'EdgeColor', [1 1 1]);

```

**ANEXOS**

## ANEXO A - ANÁLISE FÍSICA DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO



## LAUDO DE ANÁLISE FÍSICA DO SOLO

Nome: Adriano Longo  
Município: Santa Maria  
Endereço: Camobi  
Fazenda:  
CPF: 611.546.360-20


Solicitante: Adriano Longo  
Coletador:  
Entrada: 28/12/2017  
Emissão: 05/01/2018

Cód. Barras	Cx.	Cel.	Talhão	Identificação de Amostra	Área/Gride	Prof.
17245161	F2	4	-X-	-X-	-X-	0-50cm

Cód. Barras	Areia	Silte	Argila
17245161	34,688	36,352	28,960

Cód. Barras	Zoneamento Agrícola	Classe Textural
17245161	Tipo 2	Franco

As amostras analisadas serão armazenadas por 30 dias, conforme estabelecido pelo CDC. Método de determinação: método da pipeta (Embrapa, 1987).



**Charles Bolson Pontelli**  
Responsável Técnico - CREA - RS 121906

ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20



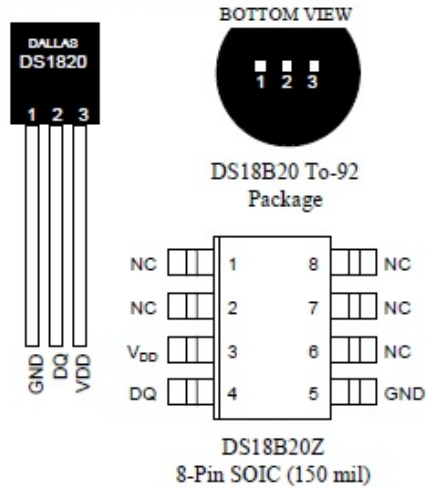
www.dalsemi.com

**DS18B20**  
**Programmable Resolution**  
**1-Wire® Digital Thermometer**

**FEATURES**

- Unique 1-Wire interface requires only one port pin for communication
- 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
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to +125°C. Fahrenheit equivalent is -67°F to +257°F
- ±0.5°C accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer resolution is programmable from 9 to 12 bits
- Converts 12-bit temperature to digital word in 750 ms (max.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

**PIN ASSIGNMENT**



**PIN DESCRIPTION**

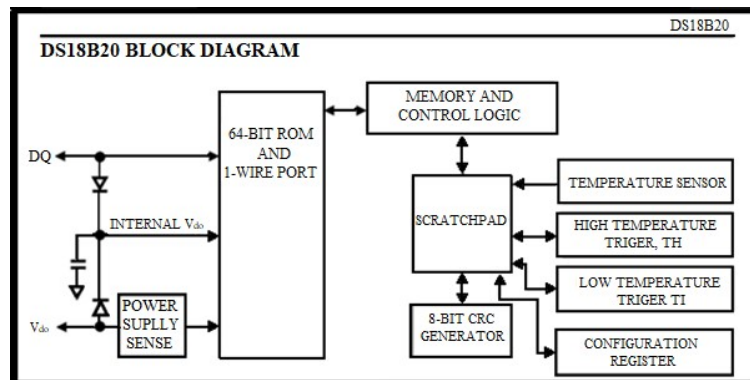
- GND - Ground
- DQ - Data In/Out
- VDD - Power Supply Voltage
- NC - No Connect

**DESCRIPTION**

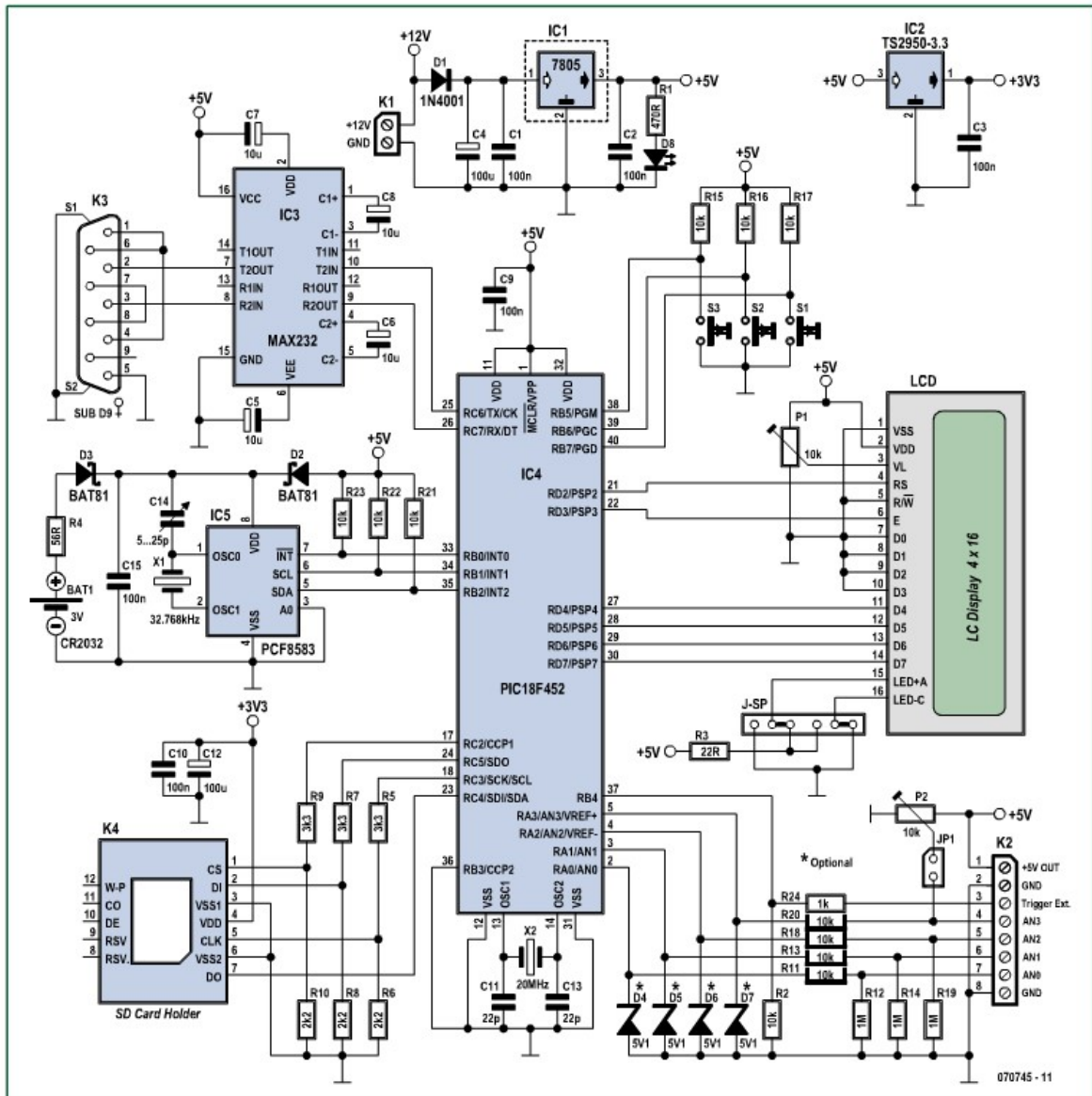
The DS18B20 Digital Thermometer provides 9 to 12-bit (configurable) temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS18B20 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS18B20. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS18B20 contains a unique silicon serial number, multiple DS18B20s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and process monitoring and control.



ANEXO C - PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS MICROCONTROLADA



Fonte: Elektor, Issue may 3/2008.

## ANEXO D - CARACTERÍSTICAS DA BOMBA D'ÁGUA

# QUAD PUMPS

## 4000 SERIES PUMPS

Flojet developed the quad pumps to deliver higher flows up to 5 GPM using a four-piston design with excellent self-priming capability.

### SPECIAL FEATURES

- Built-in pressure switch automatically starts and stops pump instantaneously when discharge valve opens and closes.
- Compact design and plug-in port fittings make installation easy.
- Can run dry without damage and handle liquids up to 130° F (54° C).
- No metal contact with liquid being pumped.
- Ball bearing drive throughout pump and motor assures longer pump life.
- Excellent self-priming capability. Pump may be located above the liquid level.
- Powerful, permanent magnet motor with low current draw and long life brushes.

### SPECIFICATIONS

Flow Rate: 3.5 to 5.0 GPM (13.2 and 18.9 L/min) Nominal			
Pump Design: Diaphragm			
Shaft Seal: None			
Motor:	TEFC	Permanent Magnet	Motor
Voltage: 12 & 24 Volt DC, 115 & 230 Volt AC			
Cycle:	50/60	hertz	for AC Models
Current:	1.5	amp max.	(115 V)
Pressure Switch Setting: 46 PSI (3.2 bar) cut out			
Maximum Operating Pressure: 40 PSI (2.8 bar)			
Self-Priming: Up to 8 ft. (2.4 m) Vertical Height			
Ports: Plug-In Ports 1/2" or 3/4" Hose Barb Standard (Consult Factory for other type of Port Fittings)			
Wetted Parts:	Housing	Modified Polypropylene - Standard	
	Elastomers	Santoprene® and Buna - Standard	
Net Weight: 4 lbs. (2 kg)			



### PUMP PERFORMANCE

