

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA LEVANTAMENTO DO
PERFIL GEOTÉRMICO SUPERFICIAL VISANDO A TROCA
SUSTENTÁVEL DE CALOR.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ADRIANO JOSÉ LONGO

SANTA MARIA-RS, BRASIL

2014

**INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA LEVANTAMENTO DO
PERFIL GEOTÉRMICO SUPERFICIAL VISANDO A TROCA
SUSTENTÁVEL DE CALOR**

Por

Adriano José Longo

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

Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

SANTA MARIA-RS, BRASIL

2014

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

Longo, Adriano José
Instrumentação Eletrônica para o Levantamento do Perfil Geotérmico Superficial Visando a Troca Sustentável de Calor / Adriano José Longo.-2014.
96 p.; 30cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2014

1. Instrumentação Geotérmica 2. Energia Geotérmica Superficial 3. Temperatura do Solo I. Farret, Felix Alberto II. Título.

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

A Comissão Examinadora abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA LEVANTAMENTO DO
PERFIL GEOTÉRMICO SUPERFICIAL VISANDO A TROCA
SUSTENTÁVEL DE CALOR**

Elaborada por

Adriano José Longo

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

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Felix Alberto Farret, PhD - UFSM
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Jordan Gustavo Trapp - IFSUL

Profa. Dra. Alzenira da Rosa Abaide - UFSM

Santa Maria, 10 de outubro de 2014

AGRADECIMENTOS

Dedico esta dissertação a Deus, a UFSM pela oportunidade concedida, ao meu Orientador, Prof. Felix Alberto Farret, pelo apoio sincero, pela amizade e pela confiança no meu trabalho.

Aos amigos e colegas de mestrado Carlos Roberto De Nardin e Felipe Teixeira Fernandes pela colaboração e espírito de grupo desenvolvido nesse período.

Aos demais colegas do CEESP pelo apoio sempre presente e pela consciência de que é pela colaboração mútua que o grupo se fortalece.

Aos meus pais, João e Dirce por me acolherem nesse mundo e serem referências de amor, trabalho e dedicação. A minha grande companheira Marilene, sempre próxima, pela ternura e paciência e a minha doce filha Luiza que me inspira a continuar a caminhada.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

INSTRUMENTAÇÃO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS DO PERFIL GEOTÉRMICO SUPERFICIAL VISANDO A TROCA SUSTENTÁVEL DE CALOR

AUTOR: ADRIANO JOSÉ LONGO

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 10 de outubro de 2014.

Atualmente existe uma preocupação de toda a sociedade com relação ao consumo racional de energia. Desta forma busca-se melhorar a eficiência energética, aumentar a proporção de fontes renováveis de energia elétrica e desenvolver tecnologias mais eficientes e limpas. O consumo residencial hoje é 26% do consumo nacional, segundo a Empresa de Pesquisa Energética EPE, sendo que os maiores consumidores de energia nos lares são os chuveiros e os condicionadores térmicos de ambientes. Essa dissertação tem por objetivo o estabelecimento de uma instrumentação eletrônica dedicada à realização de levantamentos sumários de dados do perfil geotérmico superficial do subsolo numa área qualquer, reduzindo assim custos e tempo de instalação de projetos geotérmicos para condicionamento de ambientes. Esses dados do perfil geotérmico são importantes para várias áreas no estabelecimento da capacidade de troca do calor entre materiais enterrados e o ambiente. Este conhecimento pode ser utilizado também na construção civil, arquitetura e dimensionamento de cabos de energia subterrâneos, entre outros. A área experimental utilizada foi a do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), no Campus da UFSM em Santa Maria - RS. As coletas de dados vão servir de subsídios para o estabelecimento rápido das

curvas de distribuição da temperatura do solo no local onde se pretenda estabelecer o aproveitamento da energia geotérmica. Para a coleta de dados foi desenvolvido uma placa dedicada de aquisição baseada num microprocessador PIC18f5420. A placa foi toda dimensionada, construída e programada no CEESP juntamente com um padrão de sonda tubular de PVC de cinco metros de comprimento e meia polegada de diâmetro, onde foram instalados 11 sensores digitais de temperaturas modelo DS18B20. Com esta sonda multissensora fez-se a monitoração automática da variação de temperatura subterrânea desde a superfície até a profundidade desejada. Para comprovar a efetividade da proposta da instrumentação geotérmica com a sonda sensora, fez-se uma coleta de dados de temperatura no decorrer de 12 meses, com medições registradas a cada 2 minutos. Durante o período de medição, ocorreram algumas interrupções nas medidas, mas que não interferiram no resultado final dos experimentos e serviram para demonstrar como se pode facilmente interpolar os valores da variável medida. Estabeleceram-se então parâmetros térmicos do perfil durante períodos diários, de máximas e mínimas temperaturas no decorrer de um ano. Com os resultados obtidos nesta pesquisa foi possível comprovar que a variação térmica (temperatura) do perfil do solo diminui gradativamente de acordo com a profundidade até estabilizar num valor que corresponde aproximadamente à temperatura média anual do sítio de estudo. Durante estes testes, observou-se que as medições de temperatura do solo no campus experimental do CEESP na profundidade máxima medida de cinco metros variaram entre 18 e 22 °C. Foi aplicada uma redução de dados através do Método dos Mínimos Quadrados para obter medidas que permitem projeções de temperaturas para profundidades maiores e assim recomendar as profundidades necessárias para a instalação de trocadores de calor. Os dados confirmaram as informações teóricas de que a temperatura do solo em qualquer local após alguns metros de profundidade tende a se estabilizar em um valor que corresponde à temperatura média anual da superfície do ambiente daquela área. Em Santa Maria-RS, segundo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a temperatura média anual é de 19.5 °C.

Palavras-Chave: Instrumentação geotérmica, aquisição de dados, temperatura do solo, energia geotérmica superficial.

ABSTRACT

Master Thesis

Post-graduation Program in Electrical Engineering

Federal University of Santa Maria

INSTRUMENTATION TO OBTAIN THE DATA PROFILE OF SURFACE GEOTHERMAL HEAT AIMING AT SUSTAINABLE HEAT EXCHANGE

Adriano José Longo

Supervisor: Felix Alberto Farret. Ph.D.

Santa Maria, 10 st October 2014

Nowadays, the rational energy consumption is one of the main concerns of the whole modern society. Thus, this dissertation contributes to improve energy efficiency, increase the renewable energy sources and to develop cleaner and more efficient technologies as the greatest challenges of science and technology. This is reflected in today's residential energy consumption in Brazil which is about 26%, mostly produced by equipment of high energy consumption as is the case of showers and air-conditioning, according to the Energy Research Company - EPE. The main goal of this research was to develop a dedicated electronic instrumentation to determine the superficial geothermal profile, focusing at cost reduction and short installation times. With many experimental data was possible to establish the heat exchange capacity of heat exchangers buried underground. The experimental data was obtained in the Center of Studies in Energy and Power Systems Center (CEESP) at Federal University of Santa Maria (UFSM). It was developed a dedicated acquisition board based on a microprocessor (PIC18f5420) and a tubular PVC probe setup with 11 digital temperature sensors model DS18B20 with 5 m long rod and half inch diameter. The temperature data were collected during 12 months recorded every 2 minutes.

This dissertation is mostly focused on the establishment of basic electronic instrumentation for conducting summary surveys of temperature data in shallow subsurface geothermal profile in any area, thereby reducing costs and installation times. These geothermal profile data are important for various areas in establishing the ability to exchange heat between buried materials and the homely ambient, such as construction, underground power cabling and architecture. The experimental area was the Center of Studies in Energy and Power Systems (CEESP), in the campus of UFSM in Santa Maria - RS. The data collection will serve as input for the rapid establishment of underground temperature distribution curves where is intended to utilize geothermal energy. The data collection was realized by a dedicated data logger based on the PIC18f5420 microprocessor. The entire plate is sized, constructed and programmed in CEESP along with a standard PVC tubular probe five meters long and half inch diameter fitted with 11 digital temperature sensors type DS18B20, to enable monitoring the underground temperature change from surface up to a desired depth.

Collection of temperature data was made in the course of 12 months, with measurements recorded at every 2 minutes. Some interruptions occurred during the measurement period, but it did not interfere with the final outcome results. It was then possible to establish the mean thermal profile parameters during daily periods and the maximum and minimum temperatures throughout the year.

With the results obtained in this research is possible to prove that the thermal variation (temperature) of the soil profile decreases gradually with depth until it stabilizes at a value which is approximately the average annual temperature of that local area. During these tests, it was observed that the temperature measurements in the experimental campus CEESP for a maximum depth of five meters ranged between 18 and 22 °C. The data reduction method called Least Squares Method was used to make projections of temperatures for deeper depths. Thus it was possible to confirm the theoretical information that the soil temperature at any location a few meters deep tends to stabilize at the annual average surface temperature in that place. In Santa Maria-RS, according to the National Institute of Meteorology (INMET), the annual average temperature is 19.5 °C.

Keywords – Geothermal instrumentation, data acquisition, soil temperature, surface geothermal energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Uso final no setor elétrico residencial (Fonte: Avaliação de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa de Classe Residencial PROCEL - Eletrobrás 007).....	17
Figura 1.2 – Instalação geotérmica para diminuição do consumo em aparelho de ar condicionado.....	19
Figura 2.1 - Resultados obtidos por Florides e Kalogirou em suas medições geotérmicas.....	26
Figura 2.2 - Medições geotérmicas feitas na Polônia por Popiel et al. a) estacionamento, b) gramado.....	26
Figura 4.1 - Diagrama e foto da sonda multissensora.....	42
Figura 4.2 - Diagrama de bloco do sensor DS18B2.....	43
Figura 4.3 - Detalhes construtivos da sonda multissensora.....	44
Figura 4.4 - Placa de aquisição de dados microcontrolada.....	46
Figura 4.5 - Modelo de pinagem do PIC 18F452.....	54
Figura 4.6 - Instalação da sonda multissensora geotérmica campus experimental do CEESP - Santa Maria - RS.....	48
Figura 5.1 - Variação térmica do solo em diferentes horários de um mesmo dia (22/09/2013).....	51
Figura 5.2 - Gráfico da temperatura média do mês de setembro/2013.....	52
Figura 5.3 - Gráfico da temperatura média do mês de novembro/2013.....	52
Figura 5.4 – Início da inversão dos valores de temperatura no solo devido ao início do inverno.....	53
Figura 5.5 - Gráfico das médias mensais (período setembro /2013 a agosto/2014).....	54
Figura 5.6 - Curvas da médias diárias e projeções do mês de janeiro de 2014.....	58
Figura 5.7 - Temperaturas médias diárias no período de setembro de 2013 a agosto de 2014.....	59
Figura 5.8 - Curvas das temperaturas mínimas por camada e suas projeções para profundidades maiores.....	61
Figura 5.9 - Curvas das máximas temperaturas medidas por camadas e as projeções para profundidades maiores.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Consumo no Brasil de eletricidade na rede, por classe (GWh e %)	16
Tabela 4.1 - Dados obtidos da sonda térmica padrão e salvos no cartão de memória	48
Tabela 4.2 - Dados geotérmicos armazenados em planilha Excel	49
Tabela 5.1 - Temperaturas em diferentes horários do dia 22/09/2013	50
Tabela 5.2 - Médias mensais (período setembro 2013 - agosto 2014)	53
Tabela 5.3 - Variação da temperatura conforme a profundidade em Jan/2014	55
Tabela 5.4 - Termos para a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados	55
Tabela 5.5 - Médias e projeções das temperaturas de janeiro/2014	57
Tabela 5.6 - Média da temperatura em cada profundidade medida no período de set/2013 até ago/2014	60
Tabela 5.7 - Tabela das mínimas temperaturas medidas por camadas e suas projeções para profundidades maiores	60
Tabela 5.8 - Tabela das máximas temperaturas medidas por camadas e suas projeções para profundidades maiores	62
Tabela 5.9 – Ocorrência dos valores extremos de temperatura durante o período analisado	64

Sumário

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Condicionador de ar associado à energia geotérmica.....	17
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivos gerais.....	18
1.2.2 Objetivos Específico	19
1.3 Organização dos capítulos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Estudo do comportamento térmico superficial do solo.....	21
2.1.1 Propriedades Térmicas dos Solos.....	22
2.1.1.1 Condução.....	23
2.1.1.2 Convecção.....	23
2.1.1.3 Radiação.....	23
2.1.1.4 Evaporação/condensação.....	24
2.2 Comparações dos resultados obtidos com resultados existentes na literatura	24
2.3 Resumo do capítulo.....	26
3-DISTRIBUIÇÃO DO CALOR NO SUBSOLO.....	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Características térmicas do solo.....	27
3.2.1 Condutividade térmica.....	27
3.2.2 Calor Específico e Capacidade de Aquecimento Volumétrico.....	28
3.2.3 Difusividade Térmica.....	31
3.3 Fatores que Influenciam as Propriedades Térmicas dos Solos.....	31
3.3.1 Estrutura e Porosidade dos Solos.....	31

3.3.2 A Água nos Solos.....	32
3.3.3 Temperatura do perfil vertical.....	33
3.4 Ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados	34
3.4.1 Introdução.....	34
3.4.2 Ajuste de curvas por polinômios e outras funções.....	36
3.4.3 Linearização de modelos não lineares.....	38
3.5 Resumo do capítulo.....	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1 Desenvolvimento da instrumentação eletrônica e medição dos parâmetros geotérmicos.....	41
4.1.1 Sonda multissensora para medição geotérmica.....	41
4.1.2 Sistema dedicado para aquisição de dados geotérmicos.....	44
4.1.3 Detalhes construtivos da placa de aquisição de dados.....	45
4.2 Coleta de dados.....	47
4.3 Resumo do capítulo.....	49
5 ANÁLISE DOS DADOS.....	50
5.1 Introdução.....	50
5.2 Médias diárias.....	50
5.3 Médias mensais.....	51
5.4 Médias anuais.....	57
5.4.1 Curvas de mínimas temperaturas.....	59
5.4.2 Curvas de máximas.....	60
5.5 Estimativa da difusividade térmica do solo.....	63
5.5.1 Cálculo da difusividade térmica Método da Defasagem.....	64
5.5.2 Cálculo da Difusividade Térmica pelo Método Damping Depth.....	65
5.6 Resumo do capítulo.....	66
6 CONCLUSÕES.....	67
6.1 Principais contribuições desta dissertação.....	69
6.2 Sugestões para a continuidade deste trabalho.....	70
PUBLICAÇÕES.....	70
BIBLIOGRAFIA.....	72

APÊNDICE.....	75
APÊNDICE A – CICLO TÉRMICO.....	75
A.1 Ciclo de refrigeração.....	75
A.2 Ciclo Teórico simples.....	76
A.2.1 Coeficiente de Eficácia do Ciclo (β /COP)	78
A.2.2 Parâmetros que Influenciam a Eficácia (β) do Ciclo de Refrigeração.....	79
A.2.2.1 Influência da temperatura de vaporização na eficácia do ciclo.....	79
A.2.2.2 Influência da temperatura de condensação na eficácia do ciclo.....	80
APENDICE B - Sistema de transmissão de dados do tipo 1-wire™	81
B.1 Protocolo de Comunicação	81
B.2 - Topologias das redes 1-wire™.....	83
B.2.1 - Topologia linear.....	83
B.2.2 - Topologia ramificada.....	83
B.2.3 - Topologia estrela.....	84
B.3 Taxa morta.....	84
B.4. Características dos condutores.....	85
APÊNDICE C - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	87
C.1 Diagrama de blocos.....	87
C.2 Código fonte.....	88
ANEXOS.....	94
ANEXO 1 - DATASHEET DO SENSOR DS18B20.....	95

1 INTRODUÇÃO

Generalidades

A energia geotérmica superficial é uma fonte renovável ainda pouco difundida no país, mas muito pesquisada em instituições do exterior para condicionamento da temperatura de ambientes internos e redução de custos da energia elétrica. A energia geotérmica superficial é baseada na troca de calor em profundidades subterrâneas rasas e isoladas pela camada superficial terrestre até uma profundidade típica de cerca 5 metros. Nesta profundidade, a temperatura oscila entre 10 e 16 °C na maioria dos países do hemisfério norte conforme Geotics e Farret [1,2]. A eficiência energética de edificações ou de pequenas empresas pode ser ponderada pela suavização e redução da curva de carga da mesma, principalmente em horários críticos como nos horários de ponta e nos horários comerciais pela diminuição das necessidades de consumo de energia elétrica na climatização de ambientes.

Como exemplo da forma como a energia geotérmica pode contribuir para a eficiência energética pode-se citar a redução drástica de potência em equipamentos convencionais para condicionamento de ar, ou em alternativas simples com ou sem mudança de hábitos. Os resultados deste trabalho sugerem a viabilidade da utilização da energia geotérmica superficial para condicionamento térmico em habitações, podendo ser estendido também a edificações de maior porte e empresas.

O princípio básico do sistema geotérmico superficial é a circulação de um fluido refrigerante dentro de serpentinas enterradas com o auxílio de uma bomba de circulação, que pode ser de reduzido porte, fazendo com que ocorra a troca de calor entre o solo e o meio externo. O calor assim trocado então é transferido para o ambiente através de uma serpentina com circulação de fluido para a serpentina subterrânea e distribuída no ambiente condicionado com a ajuda de um ventilador convencional. Assim sendo, se a temperatura interna da edificação estiver acima da temperatura subterrânea, pode-se usar a troca geotérmica para refrigerá-la, e vice-versa, para aquecê-la.

Baseado nos conceitos acima descritos e na dificuldade em se obter dados sobre as características térmicas do solo e suas relações com as variações nas temperaturas externas no decorrer do ano, procurou-se desenvolver uma instrumentação eletrônica, construir e programar uma placa de aquisição de dados dedicada. Esta placa é baseada na família de

microprocessadores PIC 18F, que serviu para criar, montar e calibrar a sonda com onze sensores digitais de temperatura modelo 18B20 de alta precisão.

Com a instrumentação eletrônica descrita acima foi feito o levantamento do perfil geotérmico do solo, realizando-se medições de temperatura em intervalos de profundidade a cada meio metro, até uma profundidade máxima de cinco metros. Tais informações visaram estabelecer as temperaturas do solo em °C e suas variações sazonais de forma a tornar possível dimensionar e arranjar adequadamente trocadores de calor que componham o aproveitamento geotérmico. A extensão matemática desses dados poderá informar a melhor profundidade, a viabilidade técnica da implantação, a expectativa viável de eficiência durante as estações do ano e o cálculo da economia passível de se alcançar, entre outros.

Um motivador para este estudo foi a projeção da Empresa de Pesquisa Energética - EPE[3], vinculada ao Ministério de Minas e Energia, acerca do crescimento econômico do Brasil que deverá estar na faixa dos 4% ao ano até 2020, o que leva a uma inevitável necessidade de investimento na produção de energia elétrica. Segundo estas estimativas a capacidade instalada das usinas elétricas no Brasil deverá passar de 110 mil para 170 mil megawatts até o fim desta década. Atingir esta meta envolve a diversificação da matriz energética, com aposta na geração eólica, sem descartar as pequenas hidrelétricas, energia solar, nuclear, eólica, da biomassa entre outras.

A Tabela 1.1 apresenta uma projeção do consumo nacional de energia elétrica na rede de distribuição, identificado por classe de consumo. Entre 2010 e 2020 a taxa média de crescimento do consumo está estimada em 4,7% ao ano, sendo a classe comercial a que apresenta maior expansão nesse período (6,0% ao ano), seguida pela classe industrial (4,7% ao ano). A classe comercial aumenta a sua participação no consumo total na rede, passando de 16,8% em 2011 para 18,8% ao final do horizonte, enquanto as demais classes reduzem ligeiramente suas participações.

A partir das projeções mostradas na figura 1.1, é possível perceber que o consumo elétrico residencial é aproximadamente constante em 25% do consumo total. Percebe-se assim que o consumo residencial com climatização representa 20% do consumo total, ou seja, 5% do valor total consumido no país ou aproximadamente 22.5 GWh na atualidade, podendo chegar a 33 GWh em 2020 se mantidas essas projeções.

Brasil: Consumo de eletricidade na rede, por classe (GWh e %)

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
2011	112.690	193.437	74.102	61.210	441.439
2015	135.682	229.870	93.495	70.723	529.769
2020	166.888	283.707	123.788	84.709	659.092
Participação no consumo total (%)					
2011	25,5	43,8	16,8	13,9	100,0
2015	25,6	43,4	17,6	13,3	100,0
2020	25,3	43,0	18,8	12,9	100,0
Variação (% ao ano)*					
2010-2015	4,8	5,1	6,2	3,5	5,0
2015-2020	4,2	4,3	5,8	3,7	4,5
2010-2020	4,5	4,7	6,0	3,6	4,7

* Variações médias anuais nos períodos indicados, a partir de 2010 e 2015.

Fonte: EPE

Tabela 1.1- Consumo no Brasil de eletricidade na rede, por classe (GWh e %) (Fonte: EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas 2013)

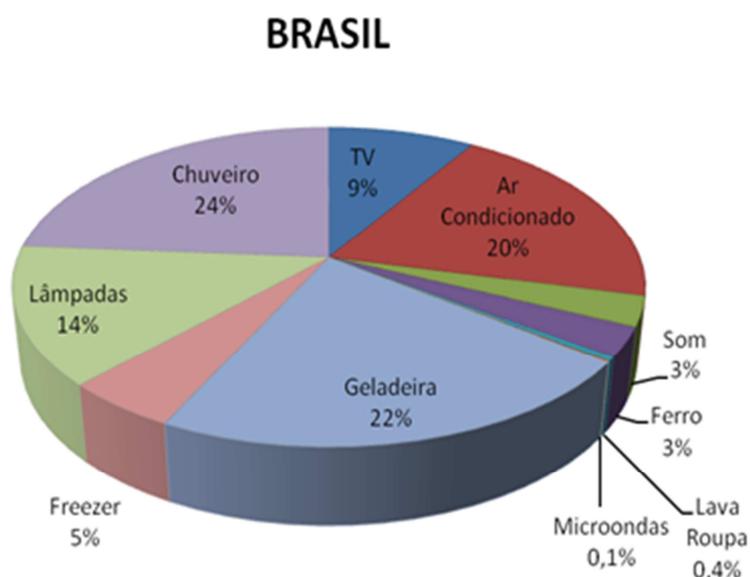


Figura 1-1 - Uso final de energia no setor elétrico residencial (Fonte: Avaliação de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa de Classe Residencial PROCEL - Eletrobrás 2007).

O foco desta dissertação é contribuir com a instrumentação eletrônica para avaliação do consumo de energia elétrica em habitações e pequenas empresas utilizando energia geotérmica como forma de diminuir ou eliminar a necessidade dos condicionadores de ar convencionais. Desta forma, pretende-se contribuir para o aproveitamento da energia geotérmica superficial como fonte de energia térmica renovável, limpa, barata, eficiente, silenciosa e inodora.

Sabe-se que a temperatura do solo a uma profundidade de 5 a 15 metros é aproximadamente a média das temperaturas anuais na superfície do ambiente que a circunda. A variação da temperatura do solo diminui conforme a profundidade. A partir dos cinco metros de profundidade a temperatura do solo tem pouca variação por depender fundamentalmente das condições climáticas da superfície definida pela temperatura média anual. Evidentemente que esta variação prática de temperatura pode ser anulada com a profundidade, porém as dimensões, os custos e o tempo de trabalho de máquinas de grande porte para escavação do terreno não justificariam o ganho energético que se obteria com isto. Daí então a razão para limitarem-se os estudos desta dissertação apenas a uma profundidade prática de 5 m. Logo, a energia geotérmica estará sempre disponível para ser utilizada, para contribuir para a redução do consumo de energia elétrica com o aproveitamento das trocas térmicas nessas profundidades e com temperaturas mais favoráveis.

Em suma, a proposta deste trabalho consiste em se estabelecer os meios eletrônicos para aquisição automática de dados para se realizar a medição da variação de temperatura em perfis de solo de até 5 metros. Isto poderá ser feito durante todas as estações do ano, de forma a disponibilizar informações nesse período que possam estabelecer a dinâmica térmica que ocorre no interior do solo na profundidade analisada. A partir dessas informações se poderão estabelecer as regiões do solo mais adequadas aos propósitos definidos em projetos para condicionamento de ar. Essa análise do comportamento térmico do solo no perfil vertical é realizada através do desenvolvimento do instrumental necessário para a coleta contínua de dados em intervalos de dois minutos, durante longos períodos de tempo.

Um motivador para este estudo foi a projeção da Empresa de Pesquisa Energética - EPE[3], vinculada ao Ministério de Minas e Energia, acerca do crescimento econômico do Brasil que deverá estar na faixa dos 4% ao ano até 2020.

1.1 Condicionador de ar associado à energia geotérmica

Nesta dissertação pretende-se estabelecer os parâmetros térmicos da distribuição de temperatura no subsolo visando um sistema geotérmico com arrefecimento dos fluidos de troca de calor em aparelhos convencionais de ar condicionado. Este estudo tem por base o diagrama Mollier mostrado na figura A.2 do Anexo A onde se pode ver que o Coeficiente de Eficiência β de condicionadores de ar está relacionado com a pressão do gás gerada

internamente, de modo que ele atinja uma temperatura alta na parte externa podendo assim realizar a troca de calor com o meio ambiente [13].

Os melhores equipamentos atuais de ar condicionado no Brasil possuem β igual a 3.21, INMETRO [1], porque o gás é comprimido a temperaturas acima de 50 °C para realizar a troca térmica em dias de calor extremo, em torno de 40 °C. Se considerarmos que na profundidade de 5 metros, a temperatura não excede 22 °C no calor intenso do verão é teoricamente possível através de um arranjo geotérmico obter β em torno de 5.8. Por exemplo, se for projetado um equipamento de ar condicionado onde a compressão precisa obter apenas uma temperatura do gás em 35 °C, uma vez que a diferença de temperatura entre os meios é suficiente para realizar a troca de calor. Assim, o dispositivo poderia, teoricamente, realizar a troca de calor com um consumo de energia de apenas 62%, pois se denomina fator β aquele que relaciona a taxa de refrigeração pelo consumo de energia elétrica.

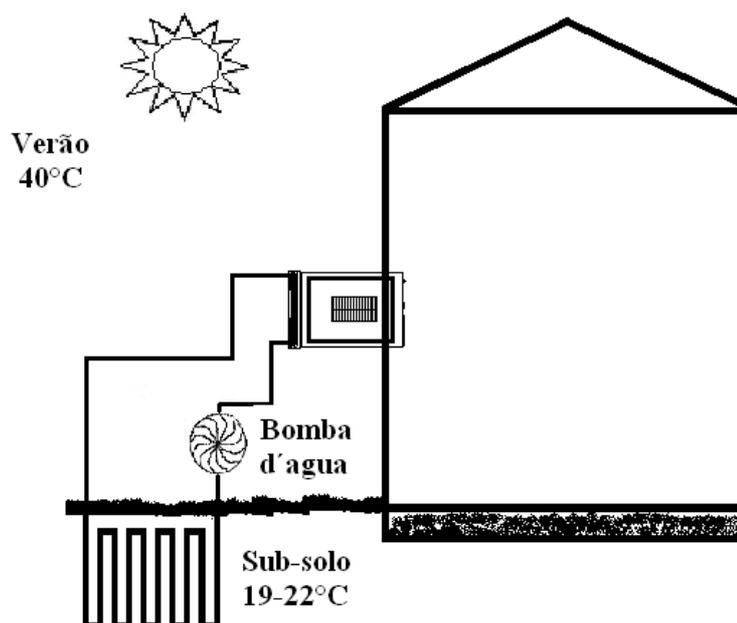


Figura 1.2 – Instalação geotérmica para diminuição do consumo em aparelho de ar condicionado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Diante do cenário atual, a consciência quanto ao uso racional das energias disponíveis, entre elas a elétrica e a térmica, é cada vez mais entendida como essencial e necessária para contrapor ao padrão atual de consumo. Esta dissertação tem por objetivo estabelecer o instrumental eletrônico e estatístico necessário para a análise das possibilidades de aproveitamento da energia geotérmica superficial como fonte auxiliar ou substituta do condicionamento térmico de ambientes residenciais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolvimento e construção do instrumental eletrônico usando uma sonda térmica padrão para aquisição expedita de dados geotérmicos superficiais;
- Estabelecimento do perfil geotérmico típico de solos, desde a superfície até 5 metros de profundidade, contemplando os períodos de temperaturas climáticas extremas, com valores menores de 0 °C até superiores a 40 °C;
- Análise matemática da variação de temperatura do solo com a profundidade buscando estabelecer a dinâmica do fluxo de calor no subsolo como forma de extrapolação expedita para profundidades maiores;
- Estabelecimento de uma metodologia para se determinar a profundidade necessária visando posicionar trocadores de calor em sistemas geotérmicos de condicionamento de ar.

1.3 Organização dos capítulos

Nesta dissertação os capítulos estão divididos da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução. São abordados os conceitos sobre energia geotérmica superficial, o seu princípio de funcionamento. A possibilidade de utilização dessa energia e a proposta de um sistema geotérmico associado a condicionadores de ar.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica. Neste capítulo são apresentadas as revisões sobre o comportamento térmico do solo, enfatizando suas características térmicas e o seu grau de influencia no processo. Foi analisado casos de estudos do perfil térmico em outros países.

Capítulo 3 – Distribuição do calor em subsolos. Listaram-se os conceitos que definem

as propriedades térmicas envolvidas na distribuição de calor no subsolo e o método dos mínimos quadrados.

Capítulo 4 – Materiais e métodos. Neste capítulo foi descrito o desenvolvimento da instrumentação eletrônica e a sua instalação no solo.

Capítulo 5 - Análise dos dados. Foram analisados os dados obtidos no período de setembro de 2013 a agosto de 2014 e extraído os resultados através de gráficos e tabelas.

Capítulo 6 – Conclusões. Apresentam-se neste capítulo as conclusões referentes aos temas abordados nos capítulos 3, 4, 5 de forma a identificar os principais aspectos que foram mais relevantes e suas contribuições nesta área de pesquisa além de sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é uma descrição das características geotérmicas típicas do solo a pequenas profundidades. São definidas as características tanto subterrâneas como do ambiente externo que influenciam no cálculo das distribuições térmicas em ambos. Aborda-se com certos detalhes o efeito da porosidade e humidade do solo, bem como os de outros fatores externos que influenciam na evolução temporal da temperatura.

2.1 Estudo do comportamento térmico superficial do solo

O aproveitamento da energia térmica logo abaixo da superfície do solo é baseado na capacidade que a área escolhida tem de trocar energia geotérmica com o meio externo através de trocadores de calor compostos de mangueiras e serpentinas. Para tal, a realização de um projeto dessa natureza requer que se tenha em mãos alguns parâmetros físicos para definir o potencial energético disponível, além das dimensões e quantidades dos componentes envolvidos. Os parâmetros físicos básicos são a temperatura do perfil vertical e a condutividade térmica do solo.

Conforme Prevedello [4], a caracterização do regime térmico do solo depende tanto da sua localização (uma vez que reflete as condições do clima sob o qual ocorre) como do tipo de solo. Ambos os parâmetros são altamente variáveis, sendo que os tipos de solo podem ser bastante diferentes numa mesma região, assim como as características climáticas. No entanto, estes dois fatores apresentam valores limites, concentrando-se em dois grandes grupos:

- Tipo de solo

- Fatores externos

A identificação dos tipos de solos depende de uma série de grandezas que caracterizam as suas propriedades físicas. Estas, por sua vez, determinam o comportamento das propriedades térmicas do solo, onde as mais importantes para este trabalho são a massa específica (ρ), condutibilidade térmica (λ) e capacidade térmica (C).

A influência dos fatores externos ao solo tais como as condições climáticas e a cobertura da área, traduzem os fluxos energéticos ocorridos na superfície do mesmo. Os dados climáticos dependem de um conjunto considerável de parâmetros que devem ser analisados. Percebe-se que o comportamento térmico do solo implica na consideração de uma quantidade elevada de variáveis as quais são analisadas individualmente nesta dissertação.

Numa primeira fase, os tipos de solo existentes são estudados segundo uma classificação geológico-mineira. Uma vez identificados os minerais constituintes do solo, quantifica-se as respectivas propriedades térmicas do conjunto.

2.1.1 Propriedades Térmicas dos Solos

Os solos estão continuamente sujeitos às mudanças de temperatura devidas às variações climáticas e a direção do fluxo de calor geotérmico do interior da Terra para a superfície. O fluxo de calor do solo é extremamente importante em áreas de estudos como Geotécnica. Esta área é relacionada com o transporte de fluidos aquecidos em tubulações subterrâneas, aproveitamento de energia geotérmica, processos de evaporação e transmissão de calor na superfície do solo pelas variações diárias e sazonais da temperatura ambiente, resfriamento de condensadores em usinas termoelétricas e nucleares, problemas com extração de petróleo, armazenamento de rejeitos radioativos, problemas de aterramento de cabos elétricos subterrâneos, entre muitos outros.

De acordo com Oliveira Jr [5], 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 pelo solo envolvendo 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 pela passagem da corrente elétrica.

A propagação de calor nos solos é governada por suas características térmicas cujo conhecimento é necessário para a modelagem do fluxo de calor. Também segundo Provedello [4] 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 serão descritos a seguir.

2.1.1.1 - Condução

O processo de condução de calor ocorre no interior do meio, via colisões e vibrações entre átomos e moléculas de uma 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 [6], pois há um maior contato entre as partículas sólidas e a água conduz melhor o calor do que o ar.

2.1.1.2 - 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, o movimento se dá apenas pela diferença de temperatura entre as partículas. Na convecção forçada o movimento é provocado predominantemente pela ação de agentes externos, assim como por diferenças de pressão. Segundo Johansen [7], os fenômenos de convecção que têm uma certa relevância para as trocas de calor podem ser verificados em solos arenosos ou em areias saturadas.

2.1.1.3 - 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 a diferentes temperaturas, mesmo sem qualquer meio físico entre os mesmos. De acordo com Farouki [6], 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.

2.1.1.4 - Evaporação/condensação

A evaporação da água é provocada pelo aumento da 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 [8], a diminuição da massa específica seca dos solos aumenta a influência da difusão do vapor de água pelo aumento do número dos vazios necessários nesse 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 [9], 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.

2.2 Resultados do perfil geotérmicos verticais existentes na literatura

Com relação a outros levantamentos de dados experimentais do perfil geotérmico vertical do solo na literatura científica pode-se citar um trabalho realizado em Chipre por Georgios Florides e Soteris Kalogirou [10], intitulado "Annual Ground Temperature Measurements at Various Depths". Este trabalho realizou medições de temperatura em um perfil vertical do solo, durante sete anos de 1986 até 1992 pelo Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Recursos Naturais do Chipre, na região de Athalassa. Os resultados obtidos pelos autores concordam com os resultados que se obteve nesta pesquisa, onde se constatou que existe um atraso relativo de tempo entre a ocorrência das máximas temperaturas nas diferentes profundidades e que a variação de temperatura tende a se estabilizar conforme aumenta a profundidade no solo pouco superior a 10 metros. A figura 2.1 mostra o gráfico dos resultados deste trabalho usado como termo de comparação.

Outro trabalho semelhante usando termopares como sensores de temperatura em dois locais diferentes para medições em solo nu e solo coberto por vegetação foi realizado por Poznan, na Polônia entre 1999 e 2001. O trabalho é intitulado "Measurements of Temperature Distribution in Ground" realizado por C.O. Popiel, J. Wojtkowiak e B. Biernacka [11] que mostrou que medições no verão sob a superfície nua abaixo de 1 metro foi 4 °C maior que em solo coberto por vegetação e que, no entanto, no inverno, não se observou maiores diferenças nos valores medidos (figura 2.2).

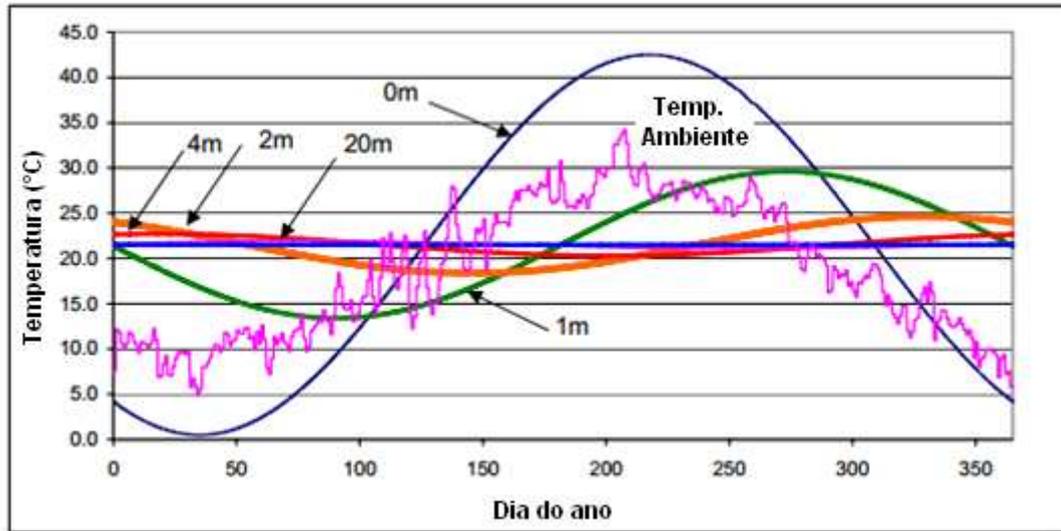


Figura 2.1 - Resultados obtidos por Florides e Kalogirou em medições geotérmicas - Chipre

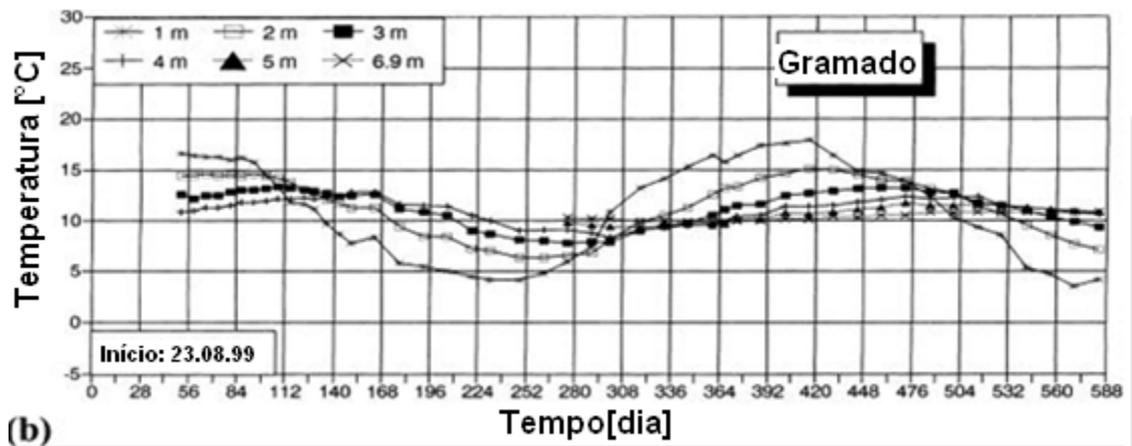
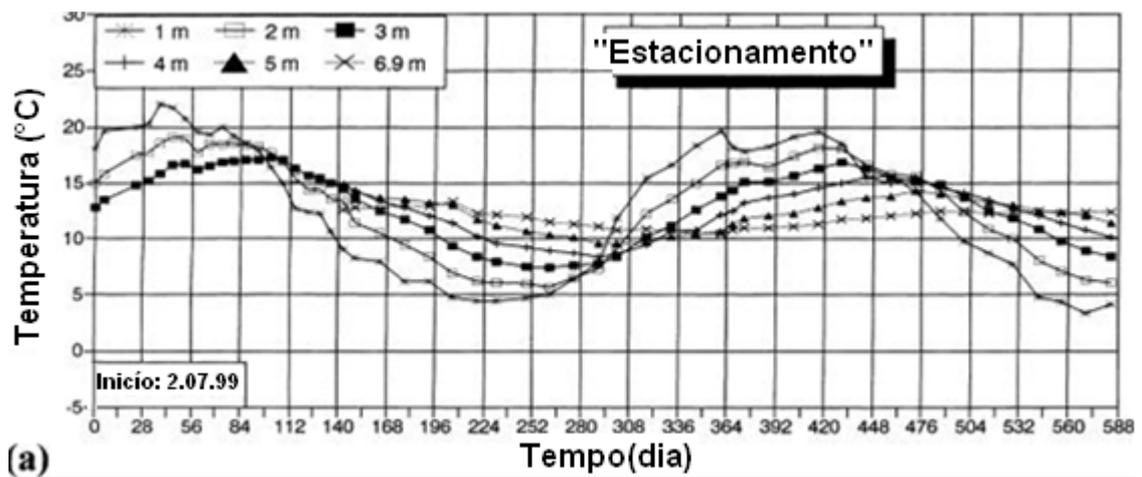


Figura 2.2 - Medições geotérmicas feitas na Polônia por Popiel et al. a) estacionamento, b) gramado.

Nwankwo et al [12] mostra que as variações de temperatura em vários tipos de solos, para profundidades até 90 cm, foram investigadas em diferentes partes do sul da Nigéria. As medições foram realizadas com a ajuda de um termômetro de mercúrio específico, ao longo de um período de três semanas. As leituras foram realizadas em três principais tipos de solo, que incluem argila, areia e lama arenosa. Uma característica dos resultados da pesquisa é de que a temperatura do solo arenoso varia mais aleatoriamente do que em outros tipos de solos. Conforme afirma o autor, fatores como, umidade, coloração. Porosidade, compactação e homogeneidade influenciaram diretamente na variação dos valores do perfil geotérmico vertical do solo.

Várias soluções analíticas de Shao et al [13]) e aproximadas em Nerpin et al. [14], da equação de condução de calor com coeficientes dependentes da profundidade têm sido estudadas. Todas as soluções das análises ainda dependem de pressupostos adicionais sobre a periodicidade da solução ou assumem um modelo paramétrico das propriedades térmicas em função da profundidade.

2.3 Resumo deste capítulo

Neste capítulo fez-se uma revisão bibliográfica referente a pesquisas sobre o comportamento térmico superficial do solo e de fenômenos físicos envolvidos, tais como radiação, convecção, condução entre outros. Os trabalhos analisados demonstram como cada solo tem características térmicas próprias locais, pois são muitas as variáveis envolvidas. Dessa forma, fica mais nítida a necessidade de se fazer in loco, estudos específicos para definir o comportamento térmico do solo.

3 DISTRIBUIÇÃO DO CALOR EM SUBSOLOS,

3.1 Introdução

Neste capítulo são estabelecidas as bases teóricas que representam a distribuição de temperatura em solos heterogêneos visando para o aproveitamento geotérmico do calor para fins de condicionamento de ambientes domésticos e empresariais. São apresentadas e definidas as características e as variáveis que envolvem o processo de difusão do calor no solo. Os fatores externos que influenciam diretamente nas características do solo e o equacionamento matemático que envolve esse fenômeno físico.

3.2 Características térmicas do solo

Abaixo estão relacionadas às principais características dos solos no que diz respeito à distribuição de calor no interior do mesmo.

3.2.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica (λ) de um solo é definida como a quantidade de calor que passa numa unidade de tempo por seção transversal unitária, devido a um gradiente de temperatura imposto na direção do fluxo.

$$\lambda = \frac{q}{A \frac{T_1 - T_2}{\ell}} \quad (3.1)$$

onde:

q - fluxo de calor (W ou J / s)

A - área da seção transversal (m²)

ΔT - gradiente de temperatura (K ou °C)

ℓ - distância percorrida (m)

λ - condutividade térmica (W/(m.K))

Existem vários métodos para se medir a condutividade térmica dos solos. Os métodos existentes são de fluxo de calor permanente e de fluxo de calor transitório. Os métodos de fluxo de calor permanente impõem um gradiente de temperatura constante aos solos por um longo período de tempo, o que pode gerar mudanças no seu teor de umidade devido à migração de umidade em solos não saturados e, conseqüentemente, mudanças nas suas propriedades térmicas. A propagação do calor através do perfil do solo, abaixo da superfície, é diretamente proporcional ao gradiente da temperatura existente na referida profundidade. O fluxo de calor será proporcional ao gradiente e a condutividade térmica do material. A condutividade térmica depende, sobretudo, da porosidade, conteúdo de umidade e matéria orgânica do solo. Para um determinado conteúdo de umidade, a condutividade térmica decresce dos solos pesados para os mais leves, conforme a porosidade aumenta. A matéria orgânica não transfere o calor tão rapidamente quanto um solo mineral. Exemplos: solo arenoso seco $k = 0,00046 \text{ cal/cm}\cdot\text{seg}\cdot\text{°C}$; solo fino humoso $k = 0,00027 \text{ cal/cm}\cdot\text{seg}\cdot\text{°C}$.

Para que seja possível a obtenção de dados do perfil de temperatura vertical num terreno é necessário o desenvolvimento de equipamentos para aquisição desses dados de forma sistemática durante um período de tempo longo. Com estes dados torna-se possível analisar também a variação sazonal da temperatura do solo e com isso estabelecer uma dinâmica de comportamento do fluxo de calor que existe abaixo da superfície, bem como estabelecer os pontos de máximas e mínimas temperaturas no decorrer do ano a diversas profundidades.

3.2.2 Calor Específico e Capacidade de Aquecimento Volumétrico

O calor específico de um determinado material é a energia necessária para aumentar de 1 °C a temperatura de 1 g de solo. A unidade de calor específico no SI (Sistema Internacional de Unidades) é $\text{cal/g}\cdot\text{°C}$. Segundo Jackson et al. [15], esse parâmetro é função da temperatura,

crescendo linearmente com o aumento da mesma, principalmente para solos granulares. Quando as temperaturas variam com o tempo, o regime de fluxo passa a ser transitório.

A energia utilizada para aumentar a temperatura de um determinado elemento de solo vem do fluxo de calor. A quantidade de energia necessária para que o aquecimento aconteça depende da capacidade de aquecimento do solo. Portanto, a capacidade de aquecimento volumétrico (C) de um solo é definida como a quantidade de calor necessária para se aumentar de 1 °C a temperatura de 1 cm³ de solo. A unidade da capacidade de aquecimento do solo no SI é cal/cm³·°C, e é representada pela seguinte relação:

$$C = \rho \cdot c \quad (3.2)$$

onde:

C - capacidade de aquecimento volumétrico (cal/cm³·°C)

ρ - massa específica do solo (g/cm³)

c - calor específico do solo (cal/g °C)

Como um volume unitário de solo é composto por sólido, água e ar, então:

$$C = x_s C_s + x_w C_w + x_a C_a \quad (3.3)$$

onde:

x_s, x_w, x_a - frações de volume dos componentes sólido, água e ar do solo, respectivamente.

C_s, C_w, C_a - capacidades de aquecimento volumétrico do sólido, água e ar do solo respectivamente (cal/ cm³ °C).

A capacidade de aquecimento volumétrico dos solos pode ser estimada através da seguinte expressão estimada de acordo com Johansen [7].

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot \left(0,18 + 1,0 \cdot \frac{W}{100} \right) \cdot C_w \quad (3.4)$$

onde:

γ_d, γ_w - pesos específicos seco do solo e peso específico da água, respectivamente.

w - umidade gravimétrica em porcentagem.

Sabendo-se que a capacidade de aquecimento volumétrico da água é igual a 1,0 cal/cm³ · °C e desenvolvendo a equação 2.2 tem-se:

$$\rho \cdot c = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(0,18 + 1,0 \cdot \frac{w}{100} \right) \quad (3.5)$$

Sabendo-se que a massa específica da água é igual a 1 g/cm³, o calor específico do solo pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$c = \frac{\rho_d}{\rho} \cdot (0,18 + w) \quad (3.6)$$

onde:

ρ_d, ρ - Massa específica seca e total do solo, respectivamente.

W - umidade gravimétrica.

3.2.3 Difusibilidade Térmica (D)

A difusibilidade térmica (D) é a capacidade que um solo tem de sofrer rápidas e consideráveis mudanças de temperatura sendo inversamente proporcional à capacidade de aquecimento volumétrico. Assim, quanto menor a energia necessária para variar a temperatura de um determinado volume de solo, mais rápido o solo vai sofrer essa variação. A expressão que define a difusividade térmica é:

$$D = \lambda/C \quad (3.7)$$

onde:

D - difusividade térmica (m^2/s)

λ - condutividade térmica ($W/(m^3 \cdot ^\circ K)$)

C - capacidade de aquecimento volumétrico ($cal/m^3 \cdot ^\circ C$)

3.3 Fatores que influenciam as propriedades térmicas dos solos

As propriedades térmicas dos solos sofrem influências de uma série de fatores que podem ser inerentes aos solos, como textura e composição mineralógica; ou fatores que podem ser influenciados externamente pelo homem ou pela natureza, como a densidade e o teor de umidade. Os principais fatores são discutidos a seguir.

3.3.1 Estrutura e Porosidade dos Solos

Solos com baixa porosidade possuem um contato maior entre os grãos possuindo maior condutividade térmica. Solos bem graduados apresentam baixa porosidade e maior peso

específico seco, ao contrário de solos com granulometria uniforme ou mal graduada, que possuem maior volume de vazios e, portanto, maior porosidade. Por outro lado, solos de granulometria fina, silto-argilosos, formados por agregados de partículas, possuem películas de água entre as partículas e não possuem contato direto entre os grãos do esqueleto sólido. Com base em observações empíricas, Johansen [7] propôs uma equação para determinar a condutividade térmica de solos naturais secos:

$$\lambda_s = \frac{0,135\rho_d + 64,7}{2700 - 0,947\rho_d}$$

(3.8)

onde:

λ - condutividade térmica (W/m·K)

ρ_d - massa específica seca do solo (kg/m³)

A presença de água nos solos melhora os contatos entre as partículas por causa das pontes de água. Para solos saturados, um aumento de densidade seca, ou seja, materiais sólidos resultam em um aumento na condutividade térmica do material, desde que a condutividade térmica da partícula sólida do solo seja maior do que a da água. Segundo Johansen [7], espera-se que as areias apresentem um maior aumento da taxa de condutividade térmica em relação aos solos argilosos com o aumento da densidade seca, pois os minerais argílicos possuem condutividade térmica em torno de 4 vezes maior do que a da água, e o quartzo em torno de 15 vezes a da água.

3.3.2 A Água nos Solos

De todos os componentes do solo, a água é o mais afetado pelas variações de temperatura no mesmo. A água tem efeitos importantes e complexos nas propriedades térmicas dos solos. A água se movimenta dentro do solo na forma líquida ou de vapor. Em consequência da transferência de calor, o movimento da água provoca mudanças nas propriedades dos solos em determinados locais devido à variação em sua quantidade e forma,

pois gradientes de temperatura induzem a sua migração. Segundo Farouki [6], o fluxo acoplado de calor e umidade tem também complexas interações com os efeitos da temperatura, uma vez que esta determina a distribuição das fases da água, seu movimento e o grau de sua interação com os minerais sólidos dos solos.

A água pode estar presente no solo de forma livre ou presa através de combinações químicas nas superfícies das partículas sólidas, forças de Van der Waals, ou presa nos contatos entre as partículas ou nos poros capilares. A camada de água adsorvida na superfície das partículas de argila forma uma camada elétrica dupla, cujas propriedades como viscosidade e densidade, são diferentes das propriedades da água livre. O aumento da temperatura no solo aumenta a energia cinética das moléculas de água e causa dispersão, Farouki [6]. A variação do conteúdo de água no solo significa uma variação também na sua condutividade térmica, que por sua vez, afeta a distribuição da temperatura no mesmo. Inversamente, a estratificação da temperatura no solo afeta a distribuição de água dentro do mesmo. A interação entre a água e os minerais do solo depende de sua quantidade, das propriedades físico-químicas e da área superficial dos minerais.

Segundo Sentelhas [16], o regime térmico de um solo é determinado pelo aquecimento da superfície pela radiação solar e transporte por condução de calor sensível para seu interior. Durante o dia, a superfície se aquece, gerando um fluxo de calor para o interior. À noite, o resfriamento da superfície por emissão de radiação terrestre (ondas longas) inverte o sentido do fluxo, que agora passa a ser do interior do solo para a superfície.

Atualmente, os dados que se tem sobre medição de temperatura do solo são quase todos destinados à agricultura. Portanto situam-se nas faixas de 0 a 80 cm de profundidade, profundidade esta onde a temperatura possui maior influência para o desenvolvimento das plantas na superfície e que está mais sujeita à exposição momentânea aos raios solares. Para maiores profundidades, os valores são estimados através de equações que precisam levar em consideração vários fatores, como condutividade do solo, teor de umidade, temperatura do ar, cobertura do solo etc.

3.3.3 Temperatura do perfil vertical

O regime térmico de um solo é determinado pelo aquecimento da superfície, pela radiação solar e transporte de calor sensível por condução para seu interior. Durante o dia, a

superfície se aquece, gerando um fluxo de calor de fora para o interior da habitação. À noite, o resfriamento da superfície acontece por emissão da radiação terrestre (ondas longas), a qual inverte o sentido do fluxo, que agora passa a ser da profundidade do solo para a superfície. O calor da superfície do solo é propagado para baixo na forma de ondas com amplitudes que decrescem rapidamente com a profundidade conforme relata Mota [17]. O retardamento das ondas de temperatura é, praticamente, linear e proporcional à profundidade num solo homogêneo.

3.4 Ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados

3.4.1 Introdução

Esse método foi utilizado com o objetivo de aplicá-lo na projeção de temperaturas do solo para profundidades além das quais foram medidas. O ajuste de curva é utilizado quando se se tem uma distribuição de pontos e se quer ajustar a melhor curva a este conjunto de dados. Inicialmente, a curva de ajuste é definida como uma função linear para uma sequência de dados “i”:

$$y_i = a + bx_i \quad (3.9)$$

Para que esta seja a reta que melhor se ajuste aos dados, deve-se minimizar a soma das diferenças entre os valores tabelados da função desconhecida, $y_i = f(x)$ e os valores da curva de ajuste $a + bx_i$ a em cada ponto. Mas esta diferença pode ser tanto positiva quanto negativa, o que pode ocasionar uma soma nula das diferenças mesmo com os valores muito distantes da reta. Uma forma de evitar o cancelamento é minimizar o quadrado destas diferenças. Supondo que sejam p pontos tabelados, define-se a função desejada como:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^p [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (3.10)$$

O problema agora é encontrar valores para “a” e “b” que minimizem $S(a,b)$. Usando notação matricial, com os resíduos definidos por:

$$r_i = y_i - (a + bx_i) \quad (3.11)$$

define-se as matrizes

$$x = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_p \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_p \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Segue-se que $y_i = a + bx_i$ para todo i variando de 1 até p é o mesmo que $AX = Y$ para minimizar os pontos tabelados:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^p r_i^2 \quad (3.13)$$

Em notação matricial tem-se que

$$\sum_{i=1}^p r_i^2 = R^t \cdot R \quad (3.14)$$

onde

$$R = Y - AX \quad (3.15)$$

Denotando $M = S(a,b)$, tem-se

$$M = (Y - AX)^T(Y - AX) = Y^T Y - X^T A^T Y - Y^T AX + X^T A^T AX \quad (3.16)$$

É necessário obter os parâmetros a e b ou, em notação matricial, o vetor X de modo a minimizar M . Para isso, o gradiente de M (ou seja, a derivada primeira da função de duas variáveis M) deve ser anulado como segue:

$$\nabla M = -A^T Y - Y^T A = 2A^T AX = 0 \rightarrow A^T AX = A^T Y \quad (3.17)$$

Assim, para encontrar-se a e b que façam com que a soma do quadrado das diferenças entre y_i e $a + bx_i$ seja mínima basta resolvermos o sistema linear.

$$A^T \cdot AX = A^T \cdot Y \quad (3.18)$$

Como a matriz $A^T A$ é simétrica definida positiva, o sistema linear admite uma solução única e esta solução é o ponto crítico que se busca que será o ponto de mínimo.

Efetuando os cálculos de $A^T A$ e $A^T Y$ tem-se:

$$A^T A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p 1 & \sum_{i=1}^p x_i \\ \sum_{i=1}^p x_i & \sum_{i=1}^p x_i^2 \end{bmatrix}, \quad A^T Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p y_i \\ \sum_{i=1}^p x_i y_i \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.4.2 Ajuste de Curvas por Polinômios e outras Funções

Pode-se generalizar este resultado para ajustar qualquer polinômio da forma

$$y = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n \quad (3.20)$$

com os pontos (x_i, y_i) fazendo:

$$r_1 = y_1 - (a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_1^n) \quad (3.21)$$

$$X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_p \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_p & x_p^2 & \dots & x_p^n \end{bmatrix}$$

Então, para encontrar os pontos a_0, a_1, \dots, a_n , tem-se que resolver o mesmo sistema

$$A^T \cdot AX = A^T \cdot Y$$

Efetuada os cálculos de $A^T AX$ e $A^T Y$ tem-se:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p x_i^0 & \sum_{i=1}^p x_i^1 & \dots & \sum_{i=1}^p x_i^n \\ \sum_{i=1}^p x_i^1 & \sum_{i=1}^p x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^p x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^p x_i^n & \sum_{i=1}^p x_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=1}^p x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p x_i^0 y_i \\ \sum_{i=1}^p x_i^1 y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p x_i^n y_i \end{bmatrix}$$

Este procedimento pode ser generalizado para qualquer curva de ajuste da forma:

$$y = a_0 g_0(x) + \dots + a_n g_n(x) \quad (3.22)$$

desde que as funções $g_i(x)$ avaliadas em cada ponto “i” resultem em vetores linearmente independentes, que é uma condição necessária para que a matriz $A^T A$ seja inversível.

3.4.3 Linearização de modelos não lineares

Na maioria das vezes a relação entre duas grandezas físicas não é linear e é fundamental descobrir de que tipo e quais os parâmetros que caracterizam a relação entre as suas grandezas. Uma das maneiras de se fazer isso é linearizar a equação. Isto pode ser conseguido fazendo uma mudança adequada de variável. Quando se suspeita que a relação x e y é da forma $y = ae^{bx}$ procede-se do seguinte modo:

Aplica-se o logaritmo natural a ambos os lados da equação:

$$\begin{aligned} \ln(y) &= \ln(ae^{bx}) \Leftrightarrow \ln(y) = \ln(a) + \ln(e^{bx}) \Leftrightarrow \\ \ln(y) &= \ln(a) + bx \end{aligned} \quad (3.24)$$

A linearização consiste em considerar a correspondência:

$$\ln(y) = \ln(a) + bx \Leftrightarrow y' = b' + a'x' \quad (3.25)$$

para ter um problema linear do tipo $y' = a'x' + b'$.

As variáveis a e b serão encontradas derivando a equação

$$S(a, b) = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (3.26)$$

em relação a e b e igualando a zero:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i) = 0 \quad (3.28)$$

Tem se assim

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.29)$$

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{n}$$

Neste caso específico de linearização

$$a' = \frac{n \sum x_i \ln(y_i) \sum x_i \sum \ln(y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} ; b' = \frac{\sum \ln(y_i) - a \sum x_i}{n} \quad (3.30)$$

Após encontrar os valores de a' e b' pode-se aplicar a igualdade da equação 3.25.

$$y' = \ln(y), \quad b' = \ln(a) \quad e \quad a' = b \quad (3.31)$$

Resolvendo a equação 3.31 para y encontra-se os dois termos (a e b') que representam a função exponencial $y = a \cdot e^{b'}$ do modelo não linear.

3.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi estabelecido os conceitos que definem os fatores envolvidos na distribuição de calor no subsolo. Foram vistos os vários métodos para se medir a condutividade térmica dos solos. As definições de calor específico, capacidade de aquecimento volumétrico e difusividade térmica do solo. Foram vistos os fatores que influenciam as propriedades térmicas dos solos e o método dos mínimos quadrados, que neste trabalho será utilizado para realizar a projeção de temperaturas do solo em profundidade superiores as medidas, através da obtenção de equações característica equivalentes.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o projeto e a implementação dos dispositivos que compõem a instrumentação eletrônica para o levantamento dos parâmetros geotérmicos. Descreve também a sistemática de coleta de dados, formas de armazenamento, além da análise dos dados através de gráficos e ferramentas matemáticas.

4.1 Desenvolvimento da instrumentação eletrônica e medição dos parâmetros geotérmicos

A instrumentação eletrônica para medição das temperaturas do subsolo e do ambiente a ser condicionado foi desenvolvida, testada e calibrada nos laboratórios do CEESP, sendo a sua maioria dedicada para esta finalidade específica.

4.1.1 Sonda multissensora para medição geotérmica

Para aquisição dos dados geotérmicos superficiais foi construída e instalada uma sonda multissensora dedicada para medição da temperatura no perfil vertical de solos para que se possa determinar a variação sazonal de temperatura nestes pontos.

Uma vez adquiridos estes dados parte-se para a definição da temperatura média esperada a cada profundidade de solo durante todo o ano. Estes dados são necessários para se definir no projeto geotérmico qual a profundidade adequada para se ter a temperatura ambiente mais próxima da desejada. Esta sonda foi confeccionada com tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada por atenderem adequadamente aos interesses de medição geotérmica deste projeto e serem leves, baratas, flexíveis e fáceis de serem trabalhadas. O comprimento total da sonda é de 5 metros, com sensores dispostos com intervalos de 50 centímetros entre si, conforme mostra a figura 4.1.

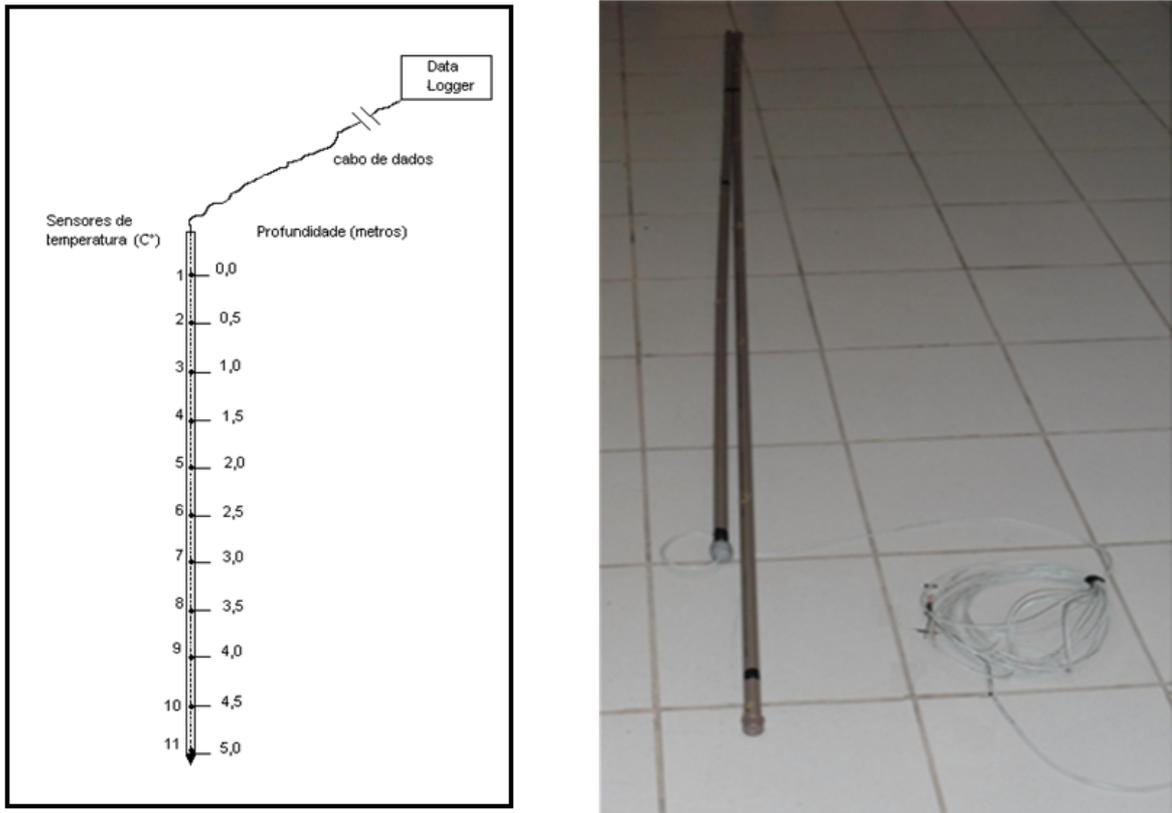


Figura 4.1 Diagrama e foto da sonda multissensora

Inicialmente, a sonda multissensora foi confeccionada utilizando como elemento sensor o circuito integrado LM35, que é um sensor analógico que permite a leitura direta da temperatura, numa escala de 10 milivolts/C°. Contudo, é necessário amplificar este sinal e realizar a calibração para obter medida confiável. Durante muito tempo esse tem sido um dos melhores sensores de temperatura do mercado, pois são precisos e informam diretamente na saída o valor analógico da tensão correspondente a temperatura medida.

Para que se tenham medidas precisas, é necessário ajustar o circuito sensor usando uma referência padrão confiável, o que às vezes pode ser difícil de conseguir. A calibração dos pré-amplificadores é também uma etapa delicada, pois o valor do sinal elétrico emitido pelo sensor normalmente é baixo demais para fazer a leitura direta ou convertê-la em dados digitais, sendo necessário amplificar e calibrar o sinal medido. Além de tudo ainda existe a necessidade de converter o sinal analógico em digital para que seja possível armazenar as informações adquiridas num processador de dados ou computador.

Para garantir uma boa confiabilidade nas leituras de temperatura foi escolhido o dispositivo DS18B20, que é um sensor de temperatura digital, com precisão de até 12 bits. Possui apenas três terminais, sendo dois destes terminais para alimentação e o outro para o barramento serial, onde é possível ligar vários sensores multiplexados, pois cada dispositivo possui um código serial próprio, de 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 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tem uma precisão de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dados retirados do datasheet do sensor estão detalhados no anexo 1 e na figura 4.2 abaixo tem-se o diagrama de blocos deste dispositivo.

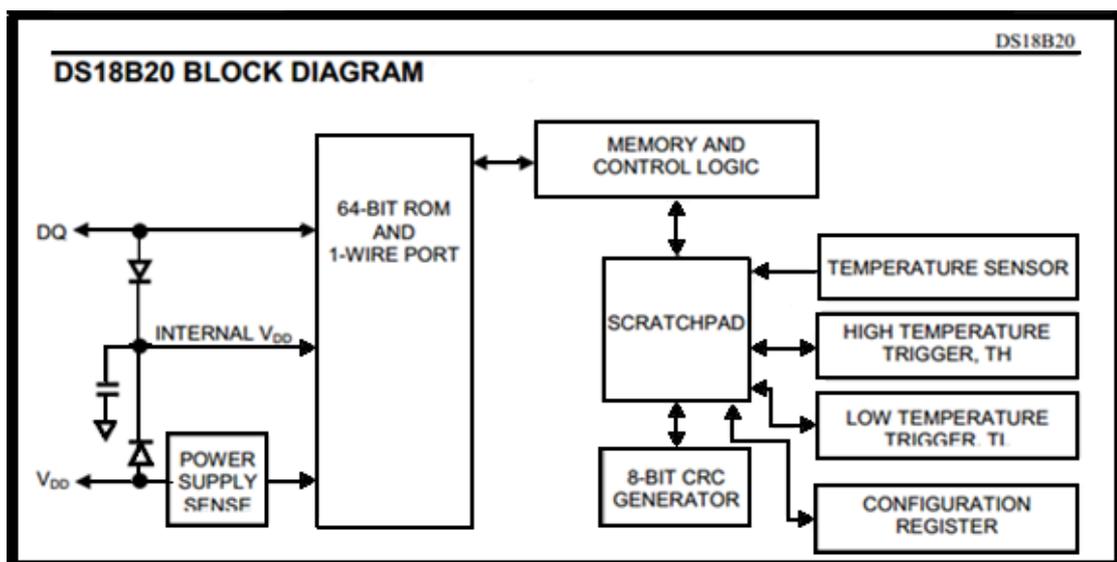


Figura 4.2 - Diagrama de bloco do sensor DS18b20

Fonte: <http://www.datasheetarchive.com/dallas%2018b20-datasheet.html>

A figura 4.3 mostra detalhes do processo construtivo da sonda padrão, que foi construída a partir de tubos de PVC de 1/2 polegada, que foram escolhidos por serem estes leves, resistentes às intempéries, fáceis de encontrar no mercado local, não reagirem com o solo através da oxidação ou corrosão, são maleáveis e baratos. Nas extremidades dos tubos fez-se a vedação utilizando os tampões comerciais usados nas instalações hidráulicas. Na extremidade superior do tampão fez-se um furo de 4 mm, por onde foi introduzido o cabo de dados.



A - Sensor fixado com resina epóxi



B - Espuma expansiva de Poliuretano

Figura 4.3 - Detalhes construtivos da sonda multissensora.

O cabo de dados utilizado na sonda multissensora foi confeccionado com o mesmo tipo de fio usado em cabos de conexões da internet, apropriados para a transmissão de sinais digitais. Esses fios são em número de três e trançados entre si para anular os efeitos espúrios capacitivos/indutivos. Os sensores são fixados por orifícios de 4 mm de diâmetro (mesmo diâmetro do sensor) feitos no tubo de PVC com distanciamento entre si de 0.5 metros. A fixação é feita com cola epóxi de alta eficiência, garantindo assim o isolamento do sensor com a parte externa, evitando problemas de umidade. Para que fosse possível tecnicamente soldar os componentes no interior do tubo, foi aberto um recorte ao redor de cada orifício. Após os trabalhos de soldagem e isolamento dos componentes eles foram cuidadosamente fixados no

tubo também com cola epóxi. (figura 4.3-a). Todo o espaço interno da sonda foi preenchido com poliuretano expandido (Figura 4.3-b) de forma a isolar termicamente todo o seu interior, evitando a circulação de ar no interior da sonda e a geração de erro nas medidas efetuadas.

4.1.2 Sistema dedicado para aquisição de dados geotérmicos

Após analisar as diversas alternativas para aquisição dos dados com a sonda multissensora, como custo e obsolescência de grande parte de suas funções, decidiu-se pelo desenvolvimento e construção de uma placa CEESP dedicada para aquisição dos dados de temperatura. Para tal usou-se o modelo divulgado na revista eletrônica portuguesa *Elektor* [18]. Esta técnica de aquisição de dados é viável e simples de ser implementada, pois necessita apenas de ferramentas disponíveis em qualquer laboratório, com componentes eletrônicos adquiridos facilmente no mercado e de uso relativamente comum. As características deste circuito atenderam a todas as necessidades desta dissertação, no que se refere à taxa de aquisição, precisão, armazenamento e velocidade de processamento das informações obtidas.

As principais características da placa CEESP de aquisição de dados são:

- Possui uma unidade de informação em tempo real (RTC).
- Realiza gravação direta em SD Card.
- Possui display de 4 x 16 linhas para monitoramento in loco das medições.
- Pode fazer medições em intervalos de até 10 segundos.
- Dispõe de um conversor A/D com resolução de 10 bits.

4.1.3 Detalhes construtivos da placa de aquisição de dados

A placa dedicada de aquisição de dados geotérmicos foi feita nos laboratórios do CEESP em todo o projeto, desenho, corrosão, furação da placa de circuito impresso e soldagem dos componentes. Além disso, para maior segurança e praticidade, a placa foi acondicionada em uma caixa metálica de blindagem, onde foi anexada uma bateria de 12 volts e 7,5 ampères, que funciona como fonte de energia “stand by” em caso de falta na rede elétrica ou para medições remotas. Buscou-se no processo construtivo da placa de aquisição, utilizar

componentes, terminais, chaves e outros materiais prontamente disponíveis em qualquer laboratório para agilizar a construção, baratear os custos e incentivar a ideia da reciclagem de materiais.



Figura 4.4 - Detalhes construtivos da placa de aquisição de dados.

Para realizar as medições de temperatura de modo contínuo durante um longo período, a alimentação elétrica da placa de aquisição de dados precisou ser mantida sempre conectada a rede elétrica ou a outra fonte de energia. A alimentação pela rede foi feita com uma fonte de tensão de 15 Vcc/500 mA, regulada por um semicondutor LM7812 e um diodo 1N7004 que estabilizaram a tensão para a placa de aquisição em 12,7 Vcc e também a mantiveram a bateria carregada, conforme a figura 4.5. A bateria para 12 Vcc/ 7.5 A, tem uma autonomia de aproximadamente 36 horas, desta forma, diminuindo a possibilidade de interrupção nas medições por falta de energia.

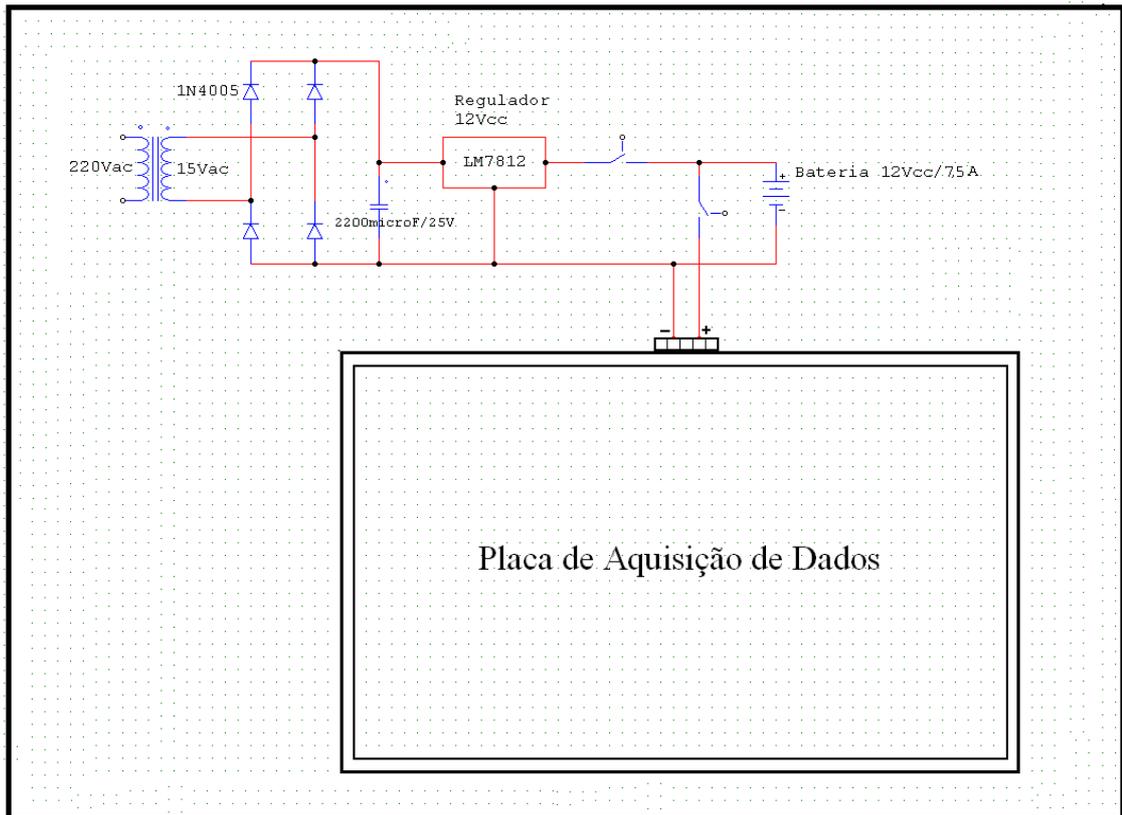


Figura 4.5 - Esquema elétrico da alimentação da placa de aquisição de dados

4.2 Coleta de dados

Após a construção e testes da sonda multissensora e da placa de aquisição de dados procedeu-se a uma escavação do solo onde se introduziu a sonda até a profundidade de 5 m. Essa introdução no solo foi realizada usando uma máquina retroescavadeira, cedida pela a prefeitura do Campus da UFSM, que realizou a abertura do solo até aproximadamente 3 m, sendo o restante feito com um trado manual (figura 4.6).

A partir da instalação dos sensores no solo, iniciou-se a aquisição dos dados. Foram necessários alguns dias de teste para que fosse possível ajustar-se a formatação do programa para que os dados coletados fossem alocados de forma racional em uma planilha analítica e armazenados para posteriores estudos sobre distribuição geotérmica de calor. Após a instalação da sonda, o sensor na profundidade de dois metros parou de funcionar. Este fato serviu para se demonstrar que mesmo que a sonda esteja sem um dos sensores pode-se inferir razoavelmente os demais dados conforme mostra a tabela 4.2. Portanto, com os dados restantes é possível caracterizar a variação térmica do solo no perfil vertical durante o período de tempo definido mesmo com a avaria de sensores uma vez que a distribuição geotérmica de

calor não é abrupta em nenhum de seus pontos.



Figura 4.6 - Instalação da sonda multissensora geotérmica (Campus experimental do CEESP - Santa Maria/RS)

Os dados obtidos e armazenados no cartão de memória flash da placa de aquisição têm o formato mostrado na Tabela 4.1 onde a primeira coluna refere-se ao horário local, e as demais colunas se referem às temperaturas da superfície até a profundidade de 5 m, com intervalos de 50 cm entre si. Como dito anteriormente, o sensor de temperatura na profundidade de dois metros parou de funcionar logo após a sua instalação, por esse motivo aparece uma leitura incorreta na sexta coluna.

06-09-13 - Bloco de notas											
Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda							
Horário	0,0 m	0,5 m	1,0 m	1,5 m	2,0 m	2,5 m	3,0 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	5,0 m
00:00	14,43	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,56	19,00	19,37
00:02	14,37	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,56	19,00	19,37
00:04	14,31	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,43	18,18	18,56	19,00	19,37
00:06	14,25	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,56	18,18	18,56	19,00	19,37
00:08	14,18	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,62	19,00	19,37
00:10	14,18	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,62	19,00	19,37
00:12	14,12	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,56	19,00	19,37
00:14	14,12	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,62	19,00	19,37
00:16	14,06	15,87	15,81	15,93	99,93	16,93	17,50	18,18	18,56	19,00	19,37

Tabela 4.1 - Dados obtidos da sonda térmica multissensora e salvos no cartão de memória.

Os dados brutos como os mostrados na Tabela 4.1 foram alocados em uma planilha

Excel, para serem adequadamente manipulados e o resultado final ficou como os mostrados na Tabela 4.2. É importante ressaltar que nessa tabela foram excluídas as medidas do sensor de 2,0 metros que apresentou falha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Horário	0.0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m
2	00:00	14,43	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,56	19	19,37
3	00:02	14,37	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,56	19	19,37
4	00:04	14,31	15,87	15,81	15,93	16,93	17,43	18,18	18,56	19	19,37
5	00:06	14,25	15,87	15,81	15,93	16,93	17,56	18,18	18,56	19	19,37
6	00:08	14,18	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,62	19	19,37
7	00:10	14,18	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,62	19	19,37
8	00:12	14,12	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,56	19	19,37
9	00:14	14,12	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,62	19	19,37
10	00:16	14,06	15,87	15,81	15,93	16,93	17,5	18,18	18,56	19	19,37

Tabela 4.2 - Dados geotérmicos armazenados em planilha Excel - A coluna A refere-se ao horário em horas e minutos, a coluna B a temperatura ambiente e nas demais as temperaturas nas profundidades indicadas.

4.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi descrito como se desenvolveu a instrumentação eletrônica utilizada no levantamento do perfil vertical do solo. Foram descritos os detalhes construtivos da sonda multissensora, desde a haste de PVC até a fixação dos sensores de temperatura e o cabo de transmissão de dados. Foi descrita a placa de aquisição de dados, suas características, detalhes construtivos e dispositivos eletrônicos utilizados. Mostrou-se como foi realizada a instalação da sonda no solo, os problemas encontrados e a forma como os dados brutos obtidos foram armazenado e posteriormente analisados.

5 ANÁLISE DOS DADOS

5.1 Introdução

Para se avaliar a variação e distribuição da temperatura no subsolo foram feitas diversas medições subterrâneas usando a sonda multissensora descrita no capítulo anterior.

Após um mês de aquisição de dados foi possível realizar as primeiras análises sobre o comportamento da temperatura no perfil do solo. Os experimentos foram realizados no período de setembro de 2013 a agosto de 2014, no campus da UFSM em Santa Maria-RS. As primeiras análises das informações adquiridas com a sonda multissensora de temperatura geotérmica superficial foram obtidos já em setembro de 2013, no início do estudo. Segundo a literatura, o comportamento do perfil geotérmico do solo em função da profundidade é característico de cada local analisado, pois são vários os fatores que determinam a difusibilidade térmica de cada solo. Uma característica, no entanto é comum a todos os locais, onde a temperatura no interior do solo tende a se aproximar da temperatura média local, conforme a profundidade aumenta.

5.2 Médias diárias

Os dados do comportamento das temperaturas no subsolo durante um dia ensolarado típico está ilustrado na Tabela 5.1 e no gráfico mostrado na figura 5.1.

Dia 22/09/2013				
Profundidade\hora	00:00	06:00	12:00	18:00
0,0	18,68	18,12	25,68	22,56
0,5	24,12	23,68	23,25	23,31
1,0	22,87	22,93	22,93	22,93
1,5	22,06	22,06	22,06	22,12
2,5	20,68	20,75	20,75	20,75
3,0	20,06	20,06	20,12	20,06
3,5	19,75	19,75	19,75	19,75
4,0	19,43	19,43	19,43	19,43
4,5	19,25	19,25	19,31	19,31
5,0	19,31	19,31	19,31	19,31

Tabela 5.1 - Temperaturas em diferentes horários do dia 22/09/2013

A temperatura abaixo do solo a 0,5 metros só começa a apresentar variação no final do dia, depois de algumas horas de exposição à radiação solar.

Devido a grande inércia térmica do solo não houve registro de variação de temperatura no decorrer do dia na profundidade medida de 1 metro o que caracteriza perfeitamente o solo como um excelente armazenador térmico.

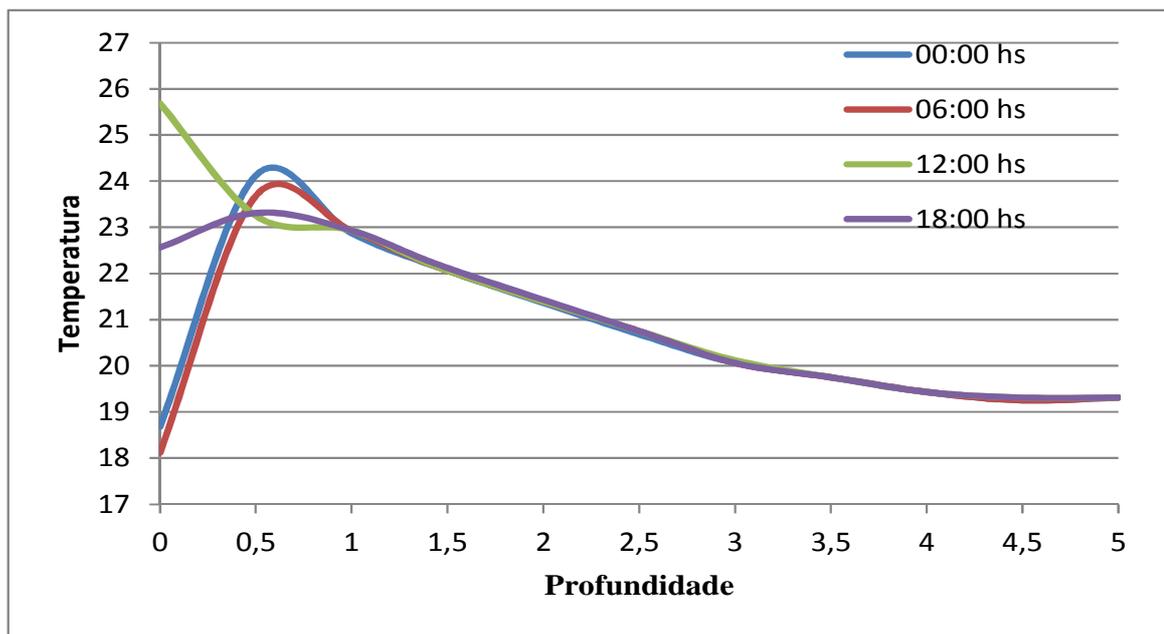


Figura 5.1 - Variação térmica do solo em diferentes horários de um mesmo dia (22/09/2013)

5.3 Médias mensais

É possível ver no gráfico da Figura 5.2 que no final do mês de setembro de 2013 a temperatura do solo desde 1,5 até 5 metros teve uma variação mínima de temperatura, oscilando entre 17 e 19 °C. As temperaturas mais próximas da superfície tenderam a acompanhar com maior rapidez as variações diárias que ocorreram na superfície.

No final do mês de novembro de 2013 começa a ocorrer um distanciamento mais acentuado entre as temperaturas das diferentes camadas de subsolo. Na profundidade de 5 metros, a temperatura permaneceu praticamente constante apesar de ter ocorrido um intenso fluxo de calor da superfície para o interior do solo fazendo com que as temperaturas começassem a se elevar, conforme a figura 5.3.

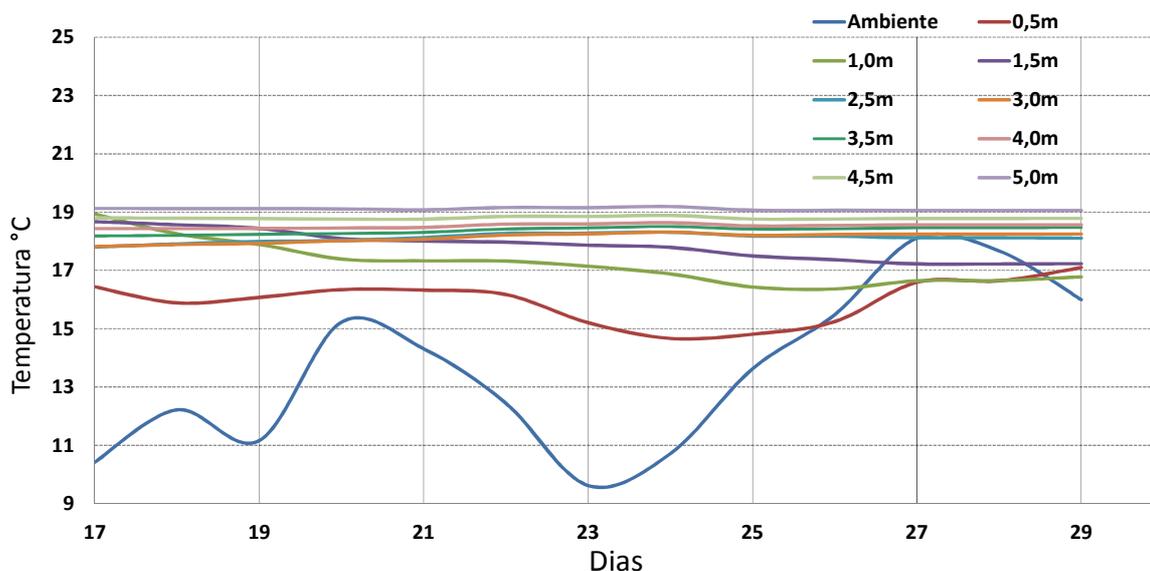


Figura 5.2 - Gráfico da temperatura média da segunda metade do mês de setembro/2013

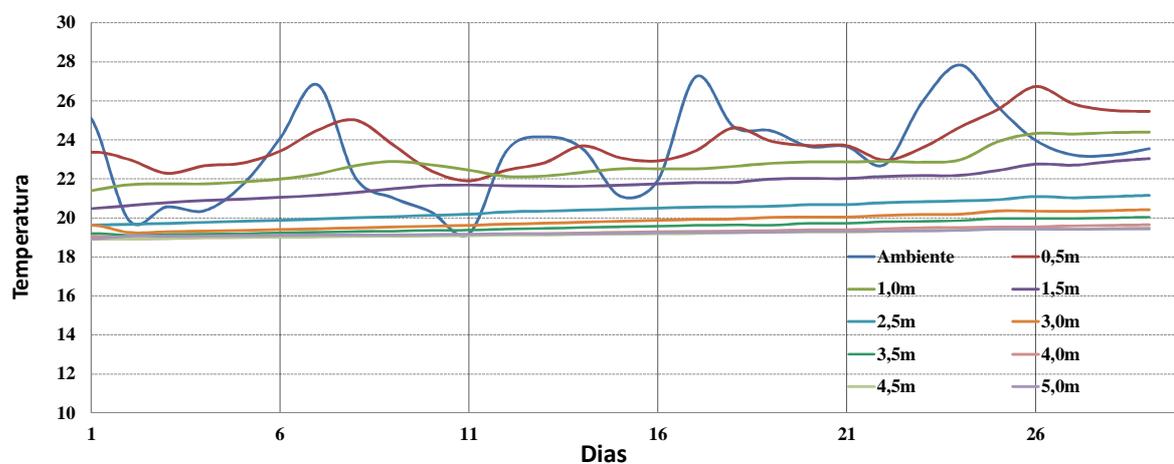


Figura 5.3 - Gráfico da temperatura média do mês de novembro/2013

No final do mês de abril de 2014 ocorreu a inversão dos valores das temperaturas mais superficiais devido à chegada dos dias mais frios, fazendo que elas passassem a serem inferiores ao valor medido na profundidade máxima de 5 metros. Essa inversão corresponde ao início de um novo sentido do fluxo de calor, onde a energia geotérmica passa a ser uma fonte quente em relação à superfície nesse período de inverno.

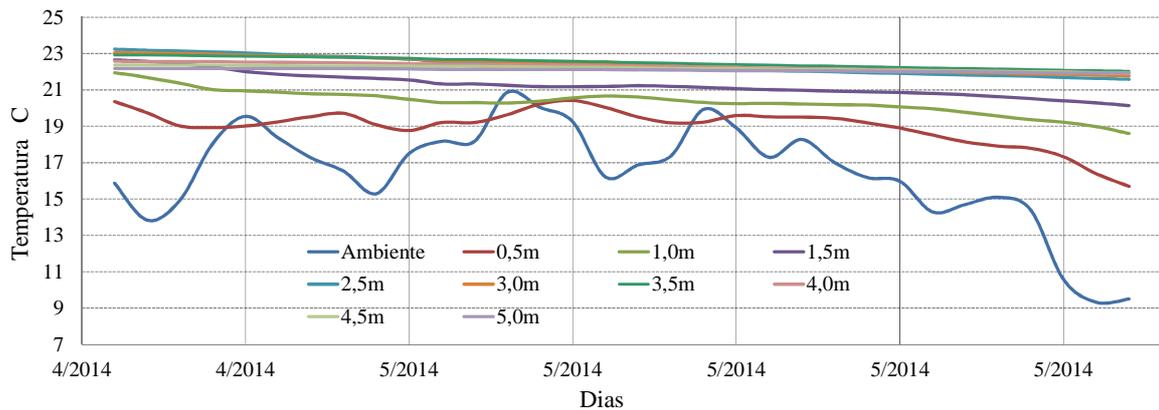


Figura 5.4 – Início da inversão dos valores de temperatura no solo devido ao início do inverno.

Diferentemente, no verão a energia geotérmica funcionou como fonte fria, podendo ser usada para amenizar as temperaturas mais altas. Abaixo se fez uma análise dos valores obtidos e suas variações diárias, mensais e do período total analisado.

Com os resultados obtidos nas medições no período de setembro de 2013 até agosto de 2014 foi possível demonstrar que as médias mensais das temperaturas em todas as profundidades medidas podem ser determinadas através de uma série de leituras diárias, realizadas com intervalos de 2 minutos. Os valores obtidos demonstram claramente a variação da temperatura no interior do solo conforme a profundidade e a estação do ano. A tabela 5.2 apresenta os valores referentes às médias mensais obtidas neste período.

Mês	Profundidade - metros									
	0 m	0,5 m	1 m	1,5 m	2,5 m	3 m	3,5 m	4 m	4,5 m	5 m
set/13	16,69	16,64	16,85	17,13	17,68	17,85	18,23	18,50	18,82	19,14
out/13	19,49	20,29	19,56	18,95	18,54	18,45	18,60	18,64	18,81	19,01
nov/13	23,34	23,69	22,64	21,69	20,38	19,81	19,54	19,26	19,18	19,22
dez/13	26,43	27,34	25,77	24,33	22,21	21,26	20,69	20,18	19,89	19,77
jan/14	27,98	28,83	27,79	26,48	24,11	22,90	22,06	21,31	20,82	20,54
fev/14	25,73	27,18	27,13	26,58	25,04	24,00	23,20	22,44	21,87	21,49
mar/14	22,54	23,63	24,26	24,62	24,47	23,90	23,44	22,89	22,38	22,04
abr/14	18,03	20,83	22,20	22,87	23,39	23,18	23,03	22,66	22,40	22,18
mai/14	16,07	18,75	20,01	20,95	22,12	22,23	22,38	22,20	22,14	22,05
jun/14	13,43	15,41	16,72	17,97	19,96	20,50	21,08	21,20	21,40	21,50
jul/14	14,86	15,52	16,49	17,37	18,87	19,33	19,94	20,18	20,54	20,73
ago/14	16,04	16,09	16,50	17,03	18,25	18,64	19,23	19,45	19,83	20,03

Tabela 5.2 - Médias mensais (período setembro 2013/agosto 2014)

Na figura 5.5 é possível visualizar-se o comportamento da temperatura durante os meses mensurados de setembro de 2013 a agosto de 2014. Nota-se que há uma defasagem entre os valores máximos medidos em relação a cada época do ano. Os valores máximos de temperatura para as profundidades mais superficiais ocorreram nos meses de dezembro e janeiro de 2014 e, conforme vai aumentando as profundidades, as máximas vão ocorrendo nos meses subsequentes. Na profundidade máxima medida de 5 metros a média mensal mais alta ocorre no mês de abril, caracterizando por uma variação bem menor que a verificada na superfície do local estudado.

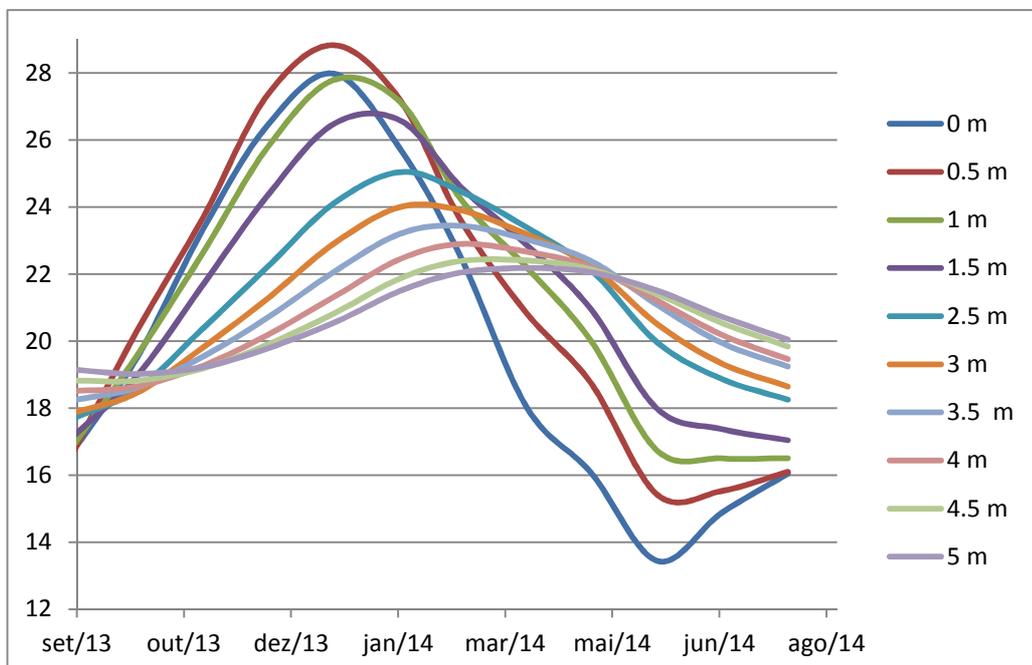


Figura 5.5 - Gráfico das médias mensais (período setembro/2013 a agosto/2014)

Outra característica das curvas de variação da temperatura geotérmica do subsolo com a profundidade é a amplitude das variações. Quanto menor for a profundidade, maior será a amplitude, ocorrendo um retardo em relação a variação das temperaturas da superfície, tanto nos valores máximos como nos mínimos devido a acomodação geotérmica do solo para cada nova temperatura.

A partir dos valores das médias mensais podem-se construir curvas de variação das temperaturas no solo em função da profundidade. Daí então, utilizando métodos de regressão linear como o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) discutido no capítulo 2, pode-se fazer

um modelo de curva para estimar valores de temperatura no solo em profundidade maiores. Tome-se como exemplo o mês de janeiro de 2014 conforme mostra a Tabela 5.3.

Meses	0,5m	1,0 m	1,5m	2,0	2,5m	3,0 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	5,0 m
jan/14	29,06	28,00	26,5	25,03	23,98	22,75	21,92	21,19	20,72	20,46

Tabela 5.3 - Variação da temperatura conforme a profundidade em Janeiro/2014

Para utilização do Método dos Mínimos Quadrados o primeiro passo é completar a tabela 5.4.

n	x_i	$y_i - y_0$	x^2	$\ln(y_i)$	$x_i \ln(y_i)$	y_i
1	0,5	9,56	0,25	2,257588	1,128794	29,06
2	1,0	8,5	1,0	2,140066	2,140066	28,0
3	1,5	7,0	2,25	1,94591	2,918865	26,5
4	2,0	5,53	4,0	1,710188	3,420376	25,03
5	2,5	4,48	6,25	1,499623	3,749058	23,98
6	3,0	3,25	9,0	1,178655	3,535965	22,75
7	3,5	2,42	12,25	0,883768	3,093186	21,92
8	4,0	1,69	16,0	0,524729	2,098914	21,19
9	4,5	1,22	20,25	0,198851	0,894829	20,72
10	5,0	0,96	25,0	-0,04082	-0,20411	20,46

Tabela 5.4 - Termos para aplicação do Método dos Mínimos Quadrados

onde:

n: número de medidas;

x_i : profundidade;

y_i, y_0 : temperatura medida e temperatura média anual, respectivamente;

Com os valores listados na tabela 5.4 calculam-se os coeficientes a' e b' usando as expressões da equação 5.1:

$$a' = \frac{n \sum x_i \ln(y_i) \sum x_i \sum \ln(y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} ; \quad b' = \frac{\sum \ln(y_i) - a \sum x_i}{n} \quad (5.1)$$

Os valores obtidos foram:

$$a' = -0,53552 ; \quad b' = 2,702533$$

Pela equação 3.31, sabe-se que:

$$a' = b \quad e \quad b' = \ln(a)$$

A equação

$$y = a \cdot e^b + y_0 \quad (5.2)$$

torna-se, então:

$$y = 14,9174e^{-0,53552} + 19,5 \quad (5.3)$$

Extrapolando os valores de profundidade, através da equação encontrada obtêm-se os resultados mostrados na tabela 5.5. A partir desta tabela, plotou-se a curva dos valores medidos e os valores extrapolados e estimados em outra. Desta forma foi possível visualizar o comportamento de ambas e perceber que a equação encontrada pelo Método dos Mínimos

Quadrados é, como se esperava, coerente com os valores medidos conforme mostra a figura 5.6. A linha tracejada serve de referência, sendo esta a temperatura média anual do local utilizado para a realização dos testes geotérmicos (Campus CEESP da UFSM). É importante observa-se que a projeção de temperaturas geotérmicas pode ultrapassar a média indicada pela linha tracejada por que o seu comportamento é o de uma senoidal amortecida conforme aumenta a profundidade

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

Tabela 5.5 - Médias e projeções das temperaturas de janeiro/2014

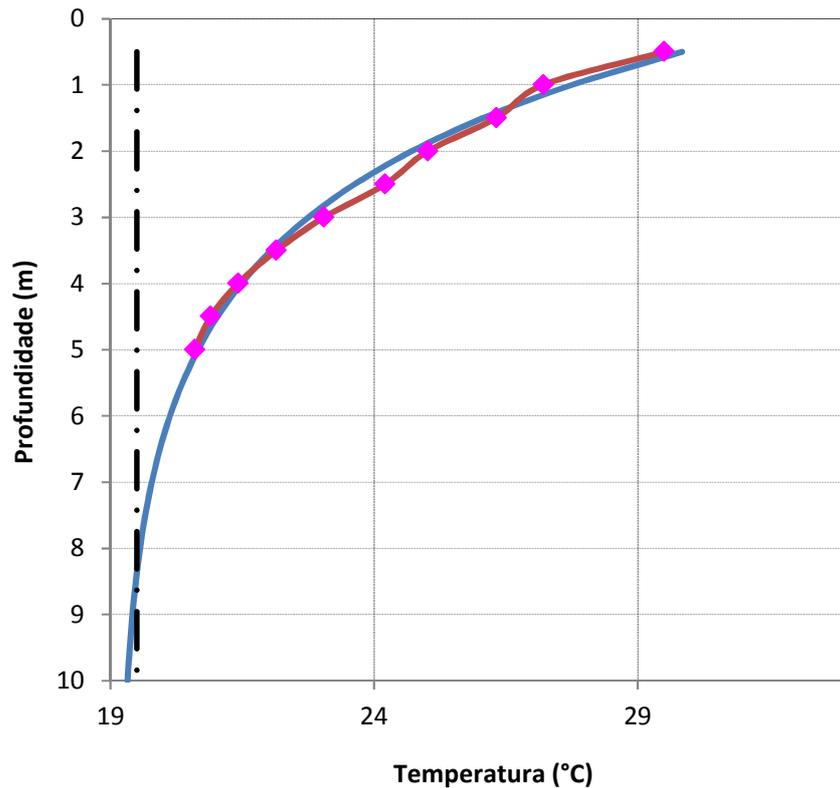


Figura 5.6 - Curvas da médias e projeções do mês de janeiro de 2014

Constatou-se durante as medidas uma variabilidade térmica maior ao longo do tempo nas regiões mais próximas da superfície do solo. Isso é um dos fatores que contribuiu para a diferença ocorrida entre os valores da medida obtida e a estimada na profundidade de 0,5 metro.

5.4 Médias anuais

O gráfico das médias diárias obtidas nas profundidades propostas, no período de setembro de 2013 até agosto de 2014 é plotadas e mostrado na figura 5.7. Neste gráfico observa-se que o comportamento das temperaturas é cíclico, variando a amplitude entre seu ponto de máximo e mínimo em função da profundidade. Quanto maior essa profundidade, menor a amplitude da variação, confirmando desta forma a teoria de que após alguns metros no solo há uma redução acentuada de variação da temperatura, tendendo este valor a temperatura média anual na superfície do solo da área estudada. Neste caso específico, é possível perceber que essas oscilações giram em torno dos 19,5 °C, que corresponde à temperatura média local no campus da UFSM.

Note-se que no gráfico da figura 5.7, houveram interrupções nos valores medidos, devido a problemas nos sensores de dados corrompidos durante os testes no cartão de memória. Após analisar-se a situação resolveu-se usá-la para demonstrar que a falta de alguns dados não interfere na qualidade mínima necessária dos dados relativos à previsão das trocas geotérmicas. A interrupção neste caso deveu-se a corrente de alimentação do sdcard estar num valor inferior ao valor sugerido pelo fabricante. Após a correção do nível da corrente de alimentação da placa o armazenamento de dados não apresentou mais problemas. Essas interrupções não influenciaram na análise dos dados, pois ocorreram poucas vezes e esses espaços podem ser preenchidos através de interpolações pela expectativa de variação suave na distribuição das temperaturas do solo.

Com base nos dados obtidos nos levantamento de dados, foram calculadas as médias aritméticas das temperaturas em todas as profundidades durante o período de coleta de dados, tendo-se chegado aos valores descritos na tabela 5.7.

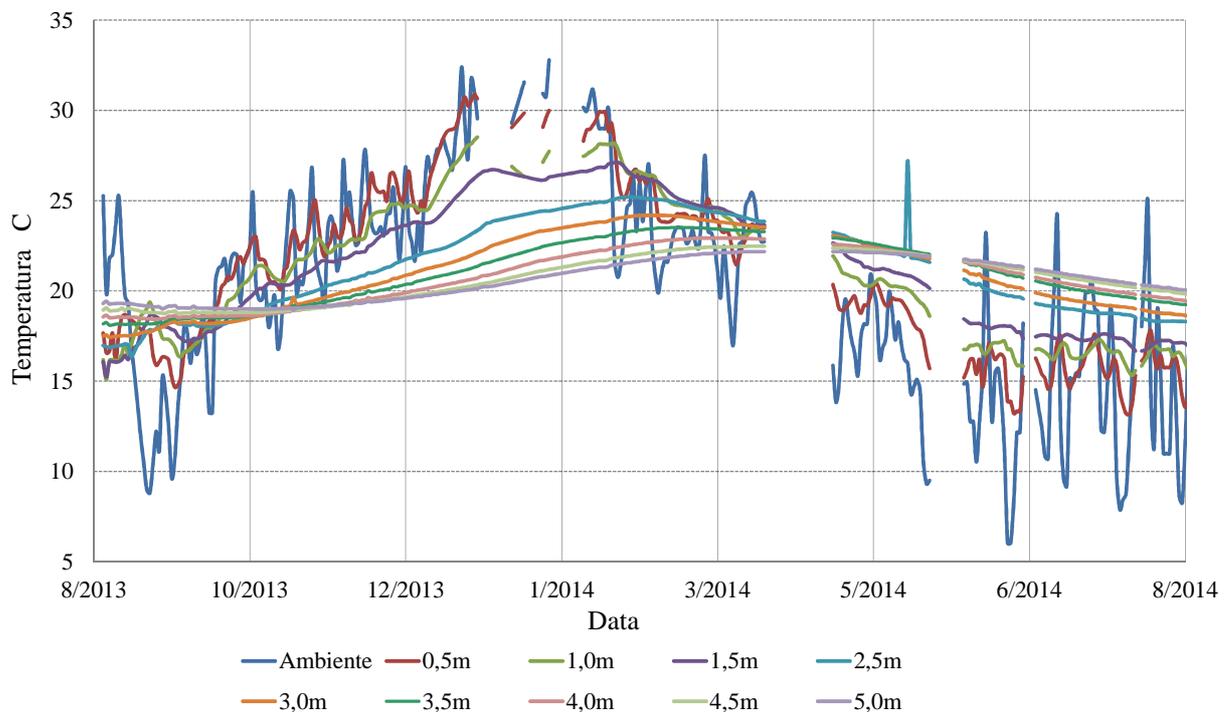


Figura 5.7 - Temperaturas médias diárias no período de setembro de 2013 até agosto de 2014.

Profundidade	0,0 m	0,5m	1,0m	1,5m	2,5m	3,0m	3,5m	4,0m	4,5m	5,0m
<u>Média</u>	19,84	20,82	20,87	21,30	21,13	20,85	20,80	20,59	20,53	20,51

Tabela 5.6- Média da temperatura em cada profundidade medida no período de setembro 2013 até agosto de 2014

Os valores médios mostrados na tabela 5.6 para cada profundidade do subsolo estão muito próximos entre si e um pouco acima da média anual que no campus da UFSM é 19,5 °C. Esta proximidade era de se esperar para o final de inverno de 2014 quando as temperaturas são mais próximas do valor médio para a região. Percebe-se que em qualquer um dos meses, independentemente da temperatura externa ser maior ou menor do que no interior do solo, a tendência da temperatura é sempre convergir para o valor da temperatura média anual da localidade conforme a profundidade aumentar.

Ordem da medidas	Profundidade (m)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Estimada (°C)
1	1,5	15,24	14,792
2	2,0	16,01	16,030
3	2,5	16,87	16,942
4	3,0	17,42	17,615
5	3,5	18,09	18,111
6	4,0	18,43	18,476
7	4,5	18,75	18,745
8	5,0	18,99	18,943
	5,5		19,090
	6,0		19,197
	6,5		19,277
	7,0		19,335
	7,5		19,379
	8,0		19,410
	8,5		19,434
	9,0		19,451
	9,5		19,464
	10		19,473
	11		19,477
	12		19,487
Equação característica: $y = 19,5 - 11,75874e^{-0,6103}$			

Tabela 5.7 - Tabela das mínimas temperaturas medidas no solo a cada 0,5 m e suas projeções para profundidades maiores (setembro/2013 até agosto/2014).

A partir dos valores máximos e mínimos registrados em cada profundidade da sonda multissensora e mostrados na tabela 3.9 foram construídas as curvas das máximas e mínimas temperaturas, para que se pudessem delimitar as oscilações ocorridas em cada ponto medido. Com esses valores, aplicou-se o Método dos Mínimos Quadrados para encontrar as equações que representam essas curvas. Através delas pode-se estimar a temperaturas do solo para profundidades maiores, bem como para a profundidade em que a temperatura do solo atingiria sua estabilidade. Esta extrapolação nos valores de temperaturas serve para se determinar com um mínimo de medidas das temperaturas geotérmicas qual seria a profundidade ideal para colocação dos trocadores de calor no subsolo num condicionamento geotérmico de ambiente.

5.4.1 - Curvas de mínimas temperaturas

Selecionando os menores valores de temperatura medidos em cada profundidade durante o período analisado de 12 meses (setembro de 2013 até agosto de 2014), plotou-se a curva correspondente a esses pontos e em seguida aplicou-se o MMQ, conforme o exemplo anterior, resultando nas estimativas que podem ser vistas na tabela 5.7. Fazendo-se então a sobreposição dos dados da tabela 5.8 em um gráfico, é possível visualizar melhor os valores e comparar a proximidade que há entre eles. Esses valores são mostrados na figura 5.7. A linha traço e ponto indica a temperatura do subsolo de 19,5 °C do subsolo de Santa Maria, RS.

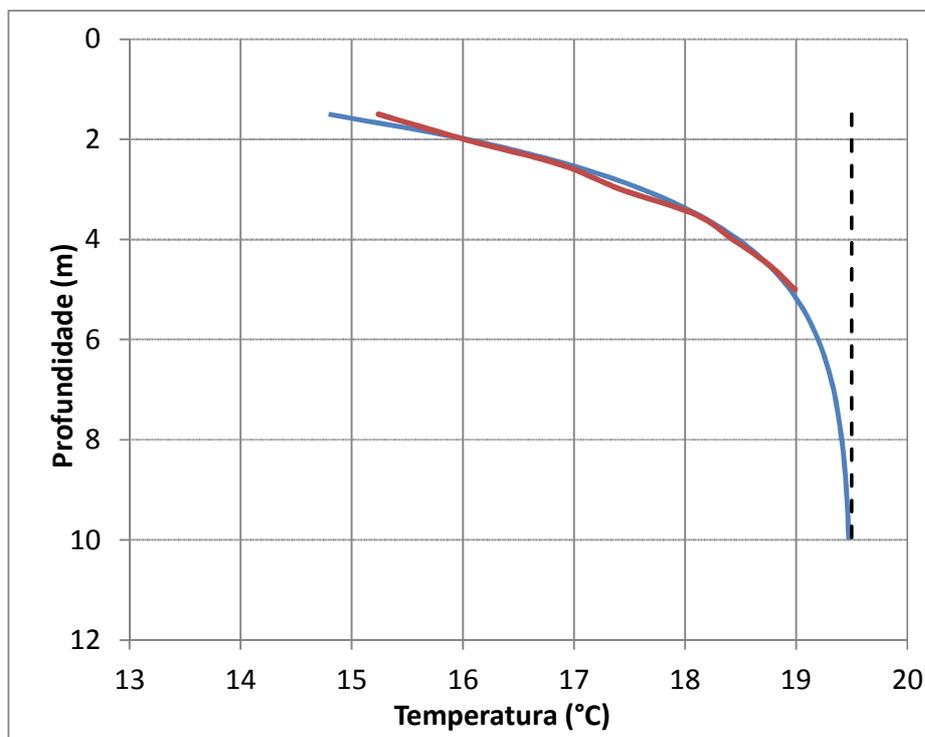


Figura 5.8. - Curvas das temperaturas mínimas por camada e suas projeções para profundidades maiores.

5.4.2 Curvas de Máximas

Da mesma maneira como se fez na seção 5.4.1 para as temperaturas mínimas, foram selecionadas as temperaturas de maior valor obtidas em cada profundidade mostrados na Tabela 5.8. A partir destes dados, foi traçado o gráfico correspondente mostrado na figura 5.8. Com o MMQ determinou-se a curva de projeção para profundidades maiores anexas na mesma tabela que, conforme se constata neste gráfico não atinge o valor médio do subsolo nesta região.

Profundidade (m)	Temp. Mínima °C	Temp. Estimada °C
0,5	30,87	30,832
1,0	28,52	29,102
1,5	27,12	27,636
2,0	26,35	26,393
2,5	25,19	25,341
3,0	24,18	24,449
3,5	23,51	23,693
4,0	22,93	23,053
4,5	22,47	22,510
5,0	22,18	22,050
5,5		21,661
6,0		21,331
6,5		21,051
7,0		20,814
7,5		20,613
8,0		20,443
8,5		20,299
9,0		20,177
9,5		20,074
10		19,986

Tabela 5.8 - Tabela das máximas temperaturas medidas por camadas e suas projeções para profundidades maiores.

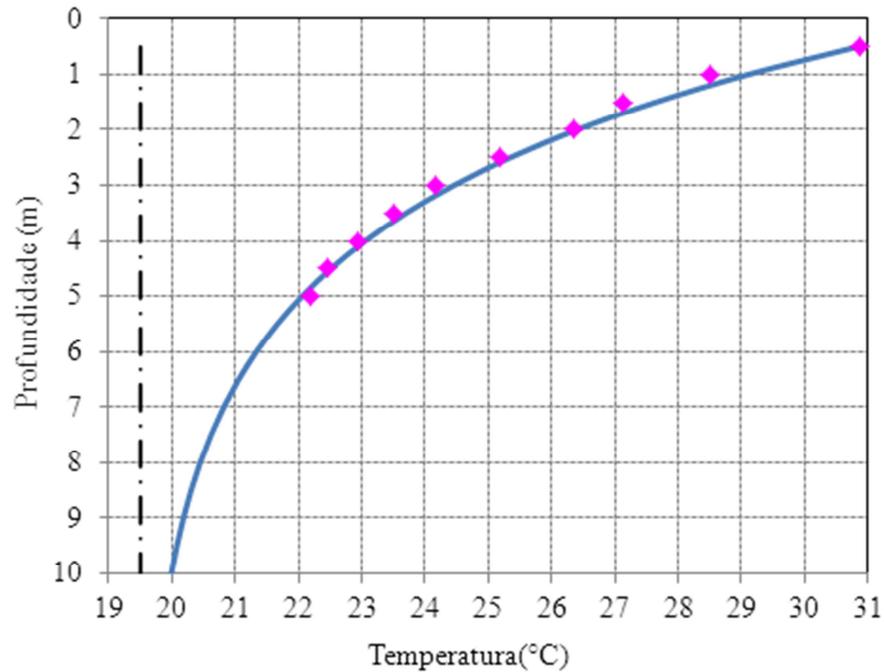


Figura 5.9 - Curvas das máximas temperaturas medidas por camadas e projeções para profundidades maiores.

Observa-se nas curvas das figuras 5.7 e 5.8 que os valores tanto das curvas de máximas como das de mínimas tendem para o valor da média anual de temperatura de 19,5 °C para profundidades próximas de 10 metros.

Os valores medidos e registrados nas tabelas 5.7 e 5.8 são as médias diárias que, portanto sofrem influência de variáveis não consideradas como a do teor de umidade do solo que se altera constantemente em função do regime de chuvas e também deve ser considerado o fato de o solo não ser homogêneo. O sistema dedicado de aquisição de dados desenvolvido e os sensores de temperatura possuem um alto grau de precisão nas medidas. Estes valores podem servir de referência na escolha da profundidade adequada para a colocação dos trocadores de calor de forma a se obter as melhores repostas para as temperaturas pretendidas ou possíveis.

5.5 Estimativa da difusividade térmica do solo.

A partir da análise dos dados que compõem a figura 5.6 é possível estimar a difusividade do solo através dos pontos extremos de máxima e mínima temperatura nas diversas profundidades medidas e também diferença de tempo em que elas ocorrem. Esse valor

é conseguido utilizando os Métodos da Defasagem e Método do Damping Depth, conforme descrito por Tuller M. et al [19] .

Profundidade(m)	Temp. Max.(C°)	Data	Temp. Min. (C°)	Data
2,5	25,2	17/02/14	18,09	04/08/14
3,0	24,18	26/02/14	18,37	13/08/14
3,5	23,57	05/03/14	18,87	20/08/14
4,0	22,93	15/03/14	19,06	04/08/14
4,5	22,47	28/03/14	19,42	08/09/14
5,0	22,18	06/04/14	19,62	08/09/14

Tabela 5.9 – Ocorrência dos valores extremos de temperatura durante o período analisado.

5.5.1 Cálculo da difusividade térmica Método da Defasagem.

O cálculo da difusividade térmica pelo Método da Defasagem, leva em consideração o período de defasagem entre os pontos de máximas temperaturas considerados. Como no período em que ocorreu as máximas nas profundidades de 4,5 e 5,0 metros nosso equipamento não estava operante, não foi possível estabelecer o momento em que elas ocorreram. Desta forma calculamos a difusividade térmica do solo entre 2,5 e 4,0 metros, partindo do princípio de que o solo é praticamente homogêneo e o resultando deve ser equivalente.

A equação da difusividade térmica do solo pelo Método da Defasagem é:

$$D_H = \frac{P(Z_1 - Z_2)^2}{4\pi(t_1 - t_2)^2}$$

onde:

D_H = Difusividade térmica (m^2/dia)

Z = Profundidade(m)

t = Data da temp. máxima (dias)

P = Período do ciclo (dias)

Cálculo entre 2,5 e 4,0 metros de profundidade

$$D_H = \frac{365 \cdot (2,5 - 4,0)^2}{4\pi(33)^2} = 0,06001 \text{ m}^2/\text{dia}$$

5.5.2 Cálculo da Difusividade Térmica pelo Método Damping Depth

O cálculo da difusividade térmica do solo nesse método é baseado no amortecimento que ocorre na amplitude da temperatura conforme aumenta a profundidade do solo.

Equação da difusividade térmica do solo pelo Método Damping Depth.

$$D_H = \frac{\pi(Z_1 - Z_2)^2}{P(\ln[A_1/A_2])^2}$$

Onde:

D_H =Difusividade térmica (m^2/dia)

Z = Profundidade(m)

P =Período do ciclo (dias)

A = Amplitude média da variação da temperatura(C°)

$$A = \frac{\text{temp. max.} - \text{temp. min}}{2}$$

Cálculo entre 2,5 e 5,0 metros de profundidade.

Encontrando os valores de A_1 e A_2 ,

$$A_1 = \frac{25,2 - 18,09}{2} = 3,55$$

$$A_2 = \frac{22,18 - 19,6}{2} = 1,29$$

$$D_H = \frac{\pi(2,5)^2}{365(\ln[3,55/1,29])^2} = 0,05224 \text{ m}^2/\text{dia}$$

5.6 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi realizada a análise dos dados obtidos através da sonda multissensora. Foram feitos estudos do comportamento dessas temperaturas nas profundidades medidas em diversos períodos de tempo. Na análise da variação diária, foi possível observar que a temperatura apresenta variação significativa apenas em profundidades menores que 1 metro, permanecendo praticamente constante nesse período de tempo. Na análise das médias mensais foi possível perceber que existe uma defasagem de tempo entre os valores máximos medidos em cada profundidade em relação à época do ano, sendo que as temperaturas mais superficiais atingiram seu máximo em dezembro e janeiro. Conforme vai aumentando a profundidade as máximas vão ocorrendo nos meses subsequentes. Com relação a média anual, foi feita a média aritmética do período medido em todas as profundidades. Os valores encontrados são muito próximos entre si, na faixa dos 20°C, apesar da grande diferença de amplitude que ocorre nas profundidades medidas. Porém um pouco superior a média anual que é atualmente 19,5 °C. Foi estimado o valor da difusividade térmica utilizando dois métodos uma que leva em consideração a defasagem de tempo entre as máximas temperaturas e a outra o amortecimento das temperaturas extremas em função da profundidade.

6 CONCLUSÕES

Essa dissertação discute a instrumentação eletrônica necessária para se fazer levantamentos de dados geotérmicos do perfil vertical de subsolos a poucos metros de profundidade. Estes dados servirão para se estabelecer a profundidade necessária para se enterrar trocadores de calor a serem usados em condicionamento geotérmico de ambientes. No protótipo usado para verificar os dados práticos usados neste trabalho, utilizou-se uma haste multissensora para medições de temperatura geotérmica até 5 m, com intervalos de 0.5 em 0,5 metros entre cada sensor para que se tenha uma profundidade de referência para localização de trocadores de calor geotérmico no subsolo e extrapolação das temperaturas em profundidades maiores.

A placa de aquisição de dados dedicada desenvolvida para um projeto como o que é discutido nesta dissertação apresentou certa instabilidade no começo das operações, observando que são fundamentais ajustes cuidadosos dos níveis de tensão e corrente de alimentação do cartão de memória. Este fato determinou a interrupção de algumas sequências de medidas durante o período observado. Todavia, estas falhas não causaram nenhum prejuízo para o estudo realizado, como demonstram o conjunto final dos dados.

Para o posicionamento físico da sonda multissensora de temperatura necessitou-se de uma retroescavadeira convencional para abertura de fossas. Com isto a instrumentação eletrônica teve um dos sensores inoperantes. Como se tratava de um sensor intermediário, usou-se este fato para demonstrar que ocorrências de ordem experimental, não invalidam a previsão de profundidade para instalação dos trocadores de calor. Retirar a sonda poderia danificá-la por completo e não ajudaria em muito as previsões pretendidas neste trabalho.

A instrumentação dedicada desenvolvida especialmente para este estudo conseguiu realizar de forma automática e continuada, durante todo o período de análise, a aquisição dos dados necessários para demonstrar os objetivos desta dissertação. Mostrou-se que mesmo num laboratório básico de eletrônica e de pouco recursos é possível construir os instrumentos para uma pesquisa de dados geotérmicos utilizando-se a facilidade atual para se conseguir informações técnicas e aquisição de componentes onde quer que sejam produzidos.

Com a instrumentação eletrônica desenvolvida nos laboratórios do CEESP e através dos dados obtidos com ela, foi possível fazer-se várias análises temporais da temperatura

geotérmica em subsolos até 5 m de profundidade. Fez-se um estudo das variações diárias que ocorrem no perfil vertical do solo e foi possível perceber que essas variações ocorrem apenas no primeiro e segundo metros. No caso analisado nesse trabalho a amplitude térmica da superfície não foi superior a 8 °C e a variação da temperatura não passou de um metro no solo. Assim foi possível constatar que acontece uma inversão das temperaturas e máximas e mínimas entre a superfície a aproximadamente 60 centímetros de profundidade, sendo que a máxima medida na superfície ocorreu às 12 horas, simultaneamente com a mínima aos 60 centímetros, que ocorreu a meia-noite, porém de maneira inversa.

A não ocorrência de variações térmicas diárias na profundidade de 1 metro, apesar da temperatura do ambiente ter se alterado com o passar dos dias, já é uma informação muito valiosa para estudos geotérmicos e para outras áreas da engenharia, arquitetura e agronomia também. Isto significa que a partir dessa profundidade sabe-se que é mínima a influência das variações térmicas que ocorrem na superfície durante o período de um dia.

Para estabelecer os parâmetros térmicos do solo para cada mês do ano, foram calculadas as médias mensais, que são valores obtidos pela média aritmética no total dos dias de cada mês. Esses valores são importantes, pois permitem que seja possível prever qual a expectativa geotérmica que se pode ter nesses períodos. Outra informação que as médias mensais demonstram é como e quando ocorre a inversão geotérmica do solo. Ou seja, quando as temperaturas mais superficiais passam de mais quentes para mais frias que as temperaturas mais profundas.

A partir dos valores das médias mensais foi possível construir curvas, utilizando métodos de regressão linear como o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), para estimar valores de temperatura no solo em profundidade maiores para cada mês do ano. A média anual pode ser feita pelo somatório das médias diárias e teoricamente é igual à temperatura média local. Porém, esses valores ficaram entre 20 e 22 °C, para todas as profundidades, levando a concluir que realmente a média anual tende a ficar próxima dos 19.5 °C.

Analisando o gráfico das medidas feitas em todo o período de aquisição de dados (figura 5.4), verifica-se que cada profundidade possui períodos diferentes de máximas e mínimas temperaturas, existindo uma defasagem entre elas. No caso do aproveitamento geotérmico, essa defasagem é benéfica, visto que na profundidade medida de 5 metros, a mínima temperatura ocorre justamente quando no verão, ou seja, quando mais se precisa trocar calor no ambiente e vice-versa, a máxima temperatura ocorre no inverno, quando se

precisa de calor para aquecer o ambiente. Essa variação de fase explica por que em certas épocas do ano a temperatura das primeiras camadas do subsolo são mais frias enquanto as mais abaixo estão mais quentes, muitas vezes bem acima da temperatura média anual.

De forma resumida é possível se dizer que a temperatura o perfil vertical do subsolo comporta-se, da superfície para o interior, como uma senoide atenuada tendo como eixo a temperatura média anual. Pelas projeções feitas neste estudo e respaldadas por estudos feitos fora do Brasil, parece que a temperatura do subsolo numa localidade qualquer chega a um valor praticamente constante e igual à média histórica do ambiente mais ou menos na faixa dos 15 metros de profundidade.

Através de dois métodos matemáticos foi possível estabelecer o valor da difusividade térmica do solo que ficou entre 0,05 e 0,06 m^2/dia . Com estas informações é possível dimensionar adequadamente projetos que visem à troca de calor como o solo.

6.1 Principais contribuições desta dissertação

Esta dissertação tornou possível o estabelecimento de uma série de informações de extrema importância na aplicação da energia geotérmica no condicionamento de ambientes. Para tal, foram usados dados da temperatura do subsolo até uns 5 m de profundidade no período de setembro de 2013 até agosto de 2014. A metodologia para localização dos trocadores geotérmicos de calor usou conhecimentos que serão úteis também em outras áreas do conhecimento, tais como construção civil, arquitetura, biologia, geofísica entre outras. Especificamente, esta dissertação contribuiu para a geotermia com os seguintes fatos:

- Estabelecimento da dinâmica do fluxo de calor no solo através da construção de curvas características da variação da temperatura, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados para prever o comportamento geotérmico em profundidades superiores as medidas.

- Definição das variações da temperatura geotérmica em função da profundidade do solo. Anteriormente ao início deste trabalho, a maioria absoluta das informações disponíveis relativas ao comportamento térmico do solo era apenas para profundidades rasas, não superiores a 1 metro, utilizadas especialmente na agricultura. Para profundidades maiores, havia apenas informações de locais distantes, que podiam apenas ser usadas como referência.

- Estabelecimento da metodologia pra análise da influência que as variações climáticas

diárias e mensais exercem no perfil da variação de temperatura vertical do solo. Mostrou-se que a influência térmica do solo ocasionada pela variação climática diária ou mensal varia conforme as características específicas de cada solo, além de outros fatores como umidade e compactação. Tal análise é decisiva para se tomar decisões de projeto na área de condicionamento geotérmico de ambientes.

-Definição das curvas de máximas e mínimas temperaturas do subsolo com o auxílio do Método dos Mínimos Quadrados, para estimar os limites das variações máximas e mínimas de temperatura desde a superfície até profundidades superiores a 10 metros. Com estas curvas pode-se inferir qual seria a profundidade mais adequada para se enterrar os trocadores de calor referidos as necessidades de um ambiente que se deseja condicionar termicamente.

6.2 Sugestões para a continuidade deste trabalho

A definição de parâmetros importantes do solo, como a capacidade volumétrica de calor, C , e a condutividade térmica, K , são variáveis que dependem de outras características, como teor de umidade e calor latente. Essas variáveis definem a chamada difusividade térmica do solo, conforme Williams G. et al. [20]. Os dados medidos neste trabalho possibilitaram a definição expedita do comportamento térmico do solo usando apenas dados durante um período pequeno. Torna-se necessário, no entanto que se expandam as medidas atuais de tal forma que novos dados contribuam para aumentar a exatidão das previsões de profundidade de solo. Sugere-se que sejam incorporadas ainda outras medidas das características do solo, como o teor de umidade, classificação melhorada do subsolo, outros pontos de medições e profundidades ainda maiores. Acredita-se que quanto maiores forem as informações sobre as características de determinado solo, futuramente se possa caracterizar esse solo de forma mais rápida, através de uma rotina específica de procedimentos. Outra sugestão de trabalho é implementar um trocador de calor geotérmico associado a aparelhos de ar condicionado, conforme descrito no capítulo 3, de forma a testar a viabilidade técnica e econômica do condicionamento geotérmico de ambientes.

PUBLICAÇÕES

- [1] Fernandes, F.T. et al. **Improved analytical solution to obtain the MPP of PV modules.** Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp. 1674 – 1678, 2013
- [2] De Nardin, C. et al. **Reduction of electrical load for air conditioning by electronically controlled geothermal energy.** Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp. 1850 - 1855, 2013
- [3] De Nardin; C.R. et al. **Underground Geothermal Energy to Reduce the Residential Electricity Consumption.** 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG™), 24 - 25 September 2014 |, Napoli, Italy
- [4] Fernandes; F.T. et al. **PV Efficiency Improvement by Underground Heat Exchanging and Heat Storage.** 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG™), 24 - 25 September 2014 |, Napoli, Italy
- [5] Longo; A.J., Farret, F.A., Fernandes, F.T., De Nardin, C.R. **Instrumentation for Surface Geothermal Data Acquisition Aiming at Sustainable Heat Exchangers.** Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, 29 Oct - 01 Nov 2014, Dallas, USA

BIBLIOGRAFIA

- [1] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - Brasília-DF, 2013. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionador_de_ar_split_hi_wall.pdf> acesso em 23.fev.2014.
- [2] FARRET, F.A.; SIMÕES, M.G. **Integration of Alternative Sources of Energy**. Ed. IEEE, Nova Iorque, EUA, 2006.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - **Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 Anos (2013-2022)**, Rio de Janeiro-RJ, 2013. Disponível em <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117_1.pdf> acesso em 12. Dez. 2013.
- [4] PREVEDELLO, C.L. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. Salesward-Discovery, Curitiba, 446p., 1996.
- [5] OLIVEIRA Jr, A.A.M. **Caracterização das Propriedades Termo-Hidráulicas de Materiais Artificiais para Reaterro de Cabos Elétricos de Potência**, 1993, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6] FAROUKI, O.T. **Physical Properties of Granular Materials with Reference to Thermal Resistivity**. Highway Research Record, 1966, nº 128, p. 25-44.
- [7] JOHANSEN, O. **Thermal Conductivity of Soils**, 1975, Ph.D. Thesis, Norway, Traduzida por USA Corps of Engineers ADA044002.)
- [8] DUARTE, A.P.L. **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**. Rio de Janeiro, 2004, 290p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.)
- [9] DE VRIES, D.A. **Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media**. In: Trans. Am. Geophys. Union, 39, no 5, 1958, p. 909-916.
- [10] FLORIDES, G.; KALOGIROU, S. **Measurements of Ground Temperature at Various Depths**, Proceedings of the SET 2004, 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies on CD-ROM, Nottingham, UK.
- [11] POPIEL, C.; WOJTKOWIAK, J.; BIERNACKA B. **Measurements of Temperature Distribution in Ground**. Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 25 pp 301-309, 2001.
- [12] NWANKWO, C.; OGAGARUE D. **An Investigation of Temperature Variation at Soil Depths in Parts of Southern Nigeria**. American Journal of Environmental Engineering 2012, 2(5): 142-147.
- [13] SHAO, M.; HORTON, R.; JAYNES, D. B.; , **Analytical solution for one-dimensional heat conduction-convection equation**, Soil Sci. Soc. Am. J., 62, 123-128, 1998.
- [14] NERPIN, S. V.; A. F.; CHUDNOVSKII, A.F.; **Heat and mass transfer in the plant-soil-air system.**, pp. 33-50, Oxonian Press Pvt./ Ltd., New Delhi, 1984.

- [15] JACKSON, R.D.; TAYLOR, S.A. **Thermal Conductivity and Diffusivity - in Methods of Soil Analysis**, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, 1986.
- [16] SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R. **Meteorologia Agrícola**, Poracicaba/SP, 2013. Disponível em <<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula6.pdf>> Acesso em 23. Jan. 2014.
- [17] MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1979. 376p.
- [18] Martynana, L. **Elektor Datalogger “Deluxe”**. Revista Elektor. Edição de março de 2008. Editora Elektor International Media BV, Portugal.
- [19] Tuller, M.; Or, D. **Soil Thermal Properties – Thermal Diffusivity**. Disponível via URL http://www.pci.tu-bs.de/agbauerecker/VorlesungSolarthermieUndWaermepumpen2014/WaermeeintragErdeLecture17_Spring2004.pdf. Consulta realizada em 21 de setembro de 2014.
- [20] WILLIAMS, G. e GOLD, L. **Canadian Building Digest N. 180.1976**. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction. Disponível em <<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd180e.html>.> Acesso em 12.nov.2013.
- [21] ELONKA, S.M. e MINICH, Q.W. **Manual de Refrigeração e Ar Condicionado**; Editora McGraw-Hill; 1978; SP.
- [22] AWTRE Y, D. **Transmitting data and power over a one-wire bus**. **Sensors – The Journal of Applied Sensing Technology**. Disponível via URL: <http://www.advanstar.com>. Consulta realizada em novembro de 2013
- [23] DALLAS SEMICONDUCTOR. **Tech brief 1: 1-wire net design guide**. Disponível via URL: <http://www.maxim-ic.com>. Consulta realizada em outubro de 2013.
- [24] DALLAS SEMICONDUCTOR. **DS1820: 1-wire digital thermometer**. Disponível via URL: <http://www.maxim-ic.com>. Consulta realizada em novembro de 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A - CICLO TÉRMICO

A.1 Ciclo de refrigeração

Os refrigeradores comuns operam com base no ciclo de compressão mecânica de vapor. O ciclo de refrigeração se vale dos processos exotérmico e endotérmico de mudança do estado físico do fluido refrigerante (líquido e gasoso). Segundo Elonca et al [21], os fluidos refrigerantes são caracterizados por se liquefazerem (condensarem) a altas pressões e se evaporarem a baixas pressões. A geração do frio nos sistemas de refrigeração se dá justamente pela mudança de estado desse fluido refrigerante de líquido para gasoso. Na figura A.1 vê-se que o processo de refrigeração começa pelo compressor comprimindo o fluido refrigerante vindo do evaporador na fase gasosa. Com isso, o fluido refrigerante tem aumentadas sua pressão e temperatura. Ao entrar no condensador, ele transfere parte do calor para o meio ambiente, fazendo com que a sua temperatura diminua e ocorra o processo de mudança de fase de gasoso para líquido, que é a condensação. Na sequência, o fluido refrigerante passa pelo elemento de controle – tubo capilar ou válvula de expansão –, que restringe a sua passagem para o evaporador, fazendo com que a sua pressão diminua. O fluido refrigerante absorve o calor dos alimentos ao evaporar-se ao longo do evaporador, até retornar ao compressor, e assim reiniciando-se o ciclo de refrigeração.

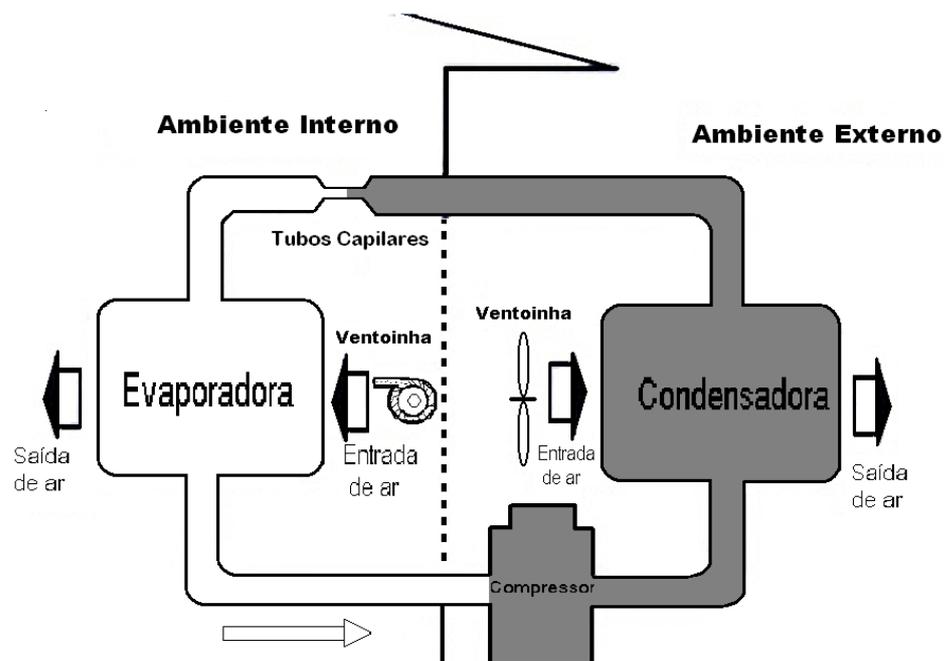


Figura A.1 Ciclo de refrigeração de um ar condicionado

A.2 Ciclo teórico simples

Para avaliarmos um ciclo térmico real, utilizamos normalmente o ciclo de Carnot, por ser este de maior rendimento térmico. Porém para o caso do ciclo de refrigeração por compressão de vapor define-se outro ciclo ideal do qual o ciclo real mais se aproxima e, portanto, torna-se mais fácil comparar. O ciclo teórico simples de refrigeração por compressão de vapor é construído sobre um diagrama de Mollier no plano P-h (pressão x entalpia), conforme figura abaixo.

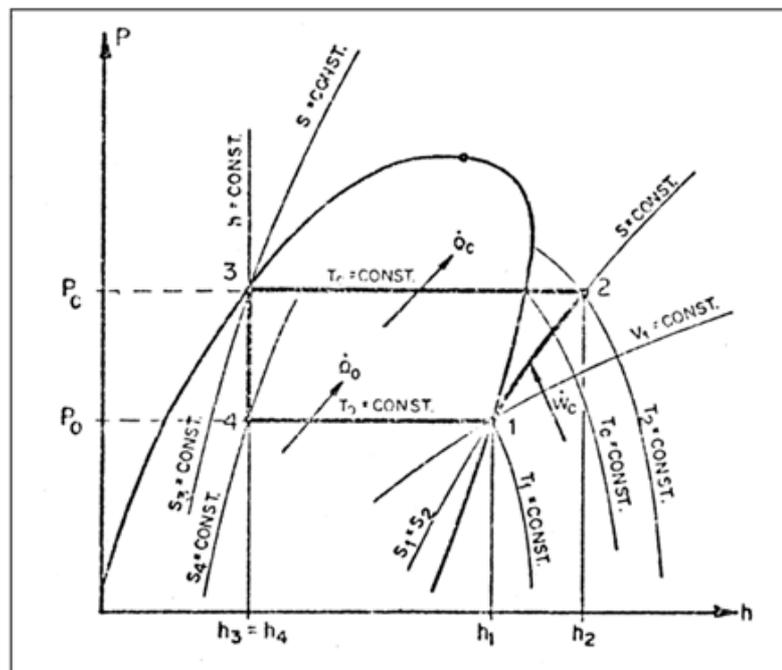


Figura A.2 -Diagrama de Moiller - Ciclo Teórico Simples de Refrigeração por Compressão de Vapor ELONKA et al [21]

Os processos termodinâmicos que constituem o ciclo teórico de refrigeração em seus respectivos equipamentos são:

a) Processos 1-2 ocorrem no compressor, e é um processo adiabático reversível; a compressão ocorre com entropia (S) constante, ou seja, $S_1 = S_2$, como mostra a Figura A.2. O refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador (P_0) e com título $X = 1$. O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação, e neste estado, ele está superaquecido com temperatura T_2 , que é maior que a temperatura de condensação (T_C).

b) Processo 2-3 ocorre no condensador, e é um processo de rejeição de calor do refrigerante para ao meio de resfriamento desde a temperatura T_2 de saída do compressor até a temperatura de condensação (TC) e a seguir há rejeição de calor na temperatura TC até que todo vapor tenha-se tornado líquido saturado na pressão de condensação (P_c).

c) Processo 3-4, que ocorre na válvula de expansão, é uma expansão irreversível a entalpia constante desde a pressão P_c e líquido saturado ($X = 0$), até atingir a pressão do evaporador P_0 . Observe-se que o processo é irreversível e, portanto, a entropia (S) do refrigerante ao deixar a válvula de expansão (S_4) é maior que a entropia do refrigerante ao entrar na válvula (S_3).

d) O processo 4-1 que ocorre no evaporador é um processo de transferência de calor a pressão constante (P_0), conseqüentemente a temperatura constante (T_0), desde vapor úmido no estado 4 até atingir o estado de vapor saturado seco ($X = 1$). Observe-se que o calor transferido ao refrigerante no evaporador não modifica a temperatura do refrigerante, mas somente muda o seu estado.

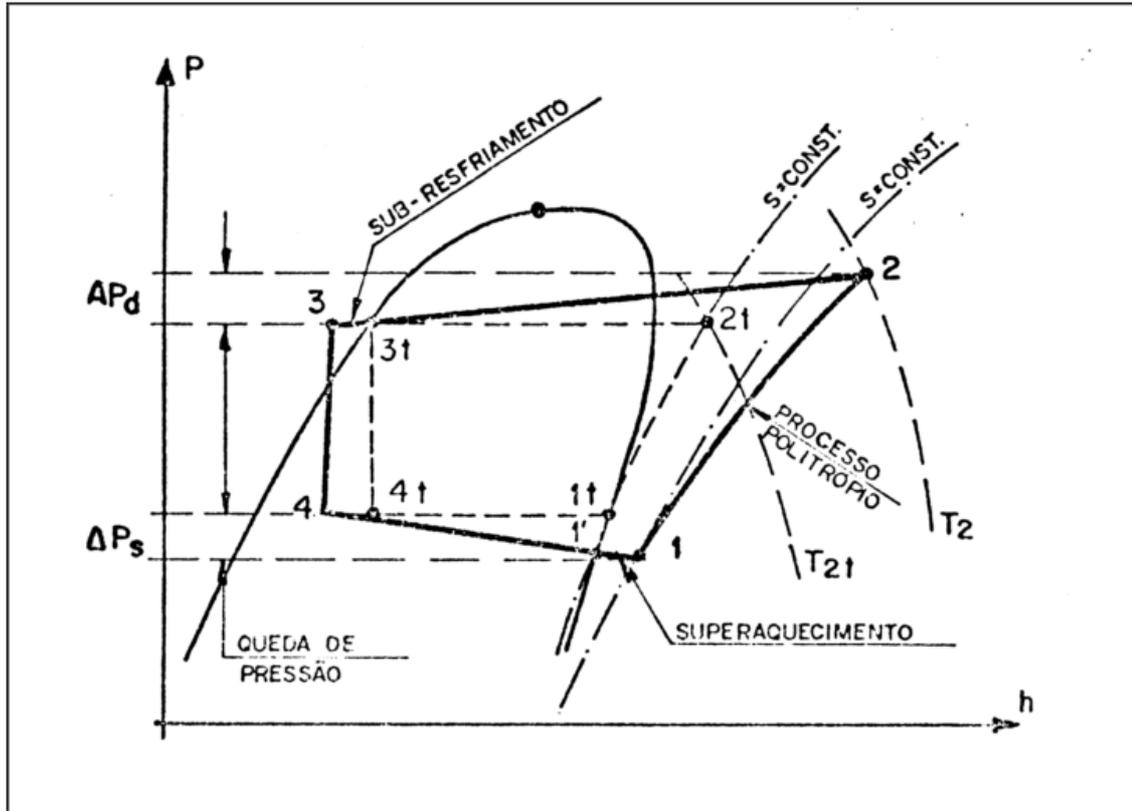


Figura A.3 - Diferenças entre o Ciclo Real e o Teórico Simples. ELONKA et al [21]

Uma das diferenças entre o ciclo real e o teórico é a queda de pressão nas linhas de descarga, líquido e de sucção assim como no condensador e no evaporador. Estas perdas de carga ΔP_d e ΔP_s estão mostradas na Figura A.3. Outra diferença é o sub-resfriamento do refrigerante na saída do condensador (na maioria dos sistemas). O superaquecimento na sucção com finalidade de evitar a entrada de líquido no compressor é um processo muito importante. Outra diferença importante é quanto ao processo de compressão ao compressor, que no ciclo real é um processo de compressão politrópico ($S_1 \neq S_2$), no lugar do processo isentrópico do ciclo ideal.

A.2.1 Coeficiente de Eficácia do Ciclo (β /COP)

O coeficiente de eficácia (β ou COP) é um parâmetro importante na análise das instalações frigoríficas. Embora o coeficiente de eficácia do ciclo real seja sempre menor que

o do ciclo ideal para as mesmas condições de operação com o ciclo ideal pode-se verificar quais os parâmetros que o influenciam assim como o grau de influência de cada parâmetro. O coeficiente de eficácia β é definido como:

$$\beta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia gasta}} = \frac{Q_0}{W_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Pode-se inferir da equação acima que o ciclo ideal a eficácia é função somente das propriedades do refrigerante, isto é, do refrigerante das temperaturas de condensação e vaporização como está mostrado mais adiante. Para o ciclo real, entretanto, o desempenho dependerá em muito das propriedades de sucção do compressor e deste, e dos demais equipamentos. O coeficiente de eficácia (β) deve ser sempre maior que 01 (um). Quanto mais próximo de 01, pior.

A.2.2 Parâmetros que influenciam a eficácia (β) do ciclo de refrigeração

Vários parâmetros influenciam a eficácia do ciclo de refrigeração. Segue-se uma análise da influência de cada um deles separadamente.

A.2.2.1 Influência da temperatura de vaporização na eficácia do ciclo

Para ilustrar o efeito que a temperatura de vaporização (T_0) tem sobre a eficácia do ciclo considera-se um conjunto de ciclos em que somente a temperatura de vaporização é alterada (a temperatura de condensação é mantida constante). Estes ciclos estão mostrados na Figura A4. Nesta análise usou-se o refrigerante-22 típico de sistemas de ar-condicionado. Lembrando-se que o calor sempre é transmitido da temperatura maior para a menor, para que um ambiente seja mantido a baixas temperaturas, o evaporador (onde ocorre a vaporização do refrigerante) deve estar a uma temperatura abaixo da do ambiente. O processo ocorre quando o sistema de refrigeração funciona continuamente, abaixando a temperatura da câmara de refrigeração, do interior da geladeira, por exemplo. Note-se que a temperatura de vaporização pode ser facilmente controlada por meio de instrumentos de automação.

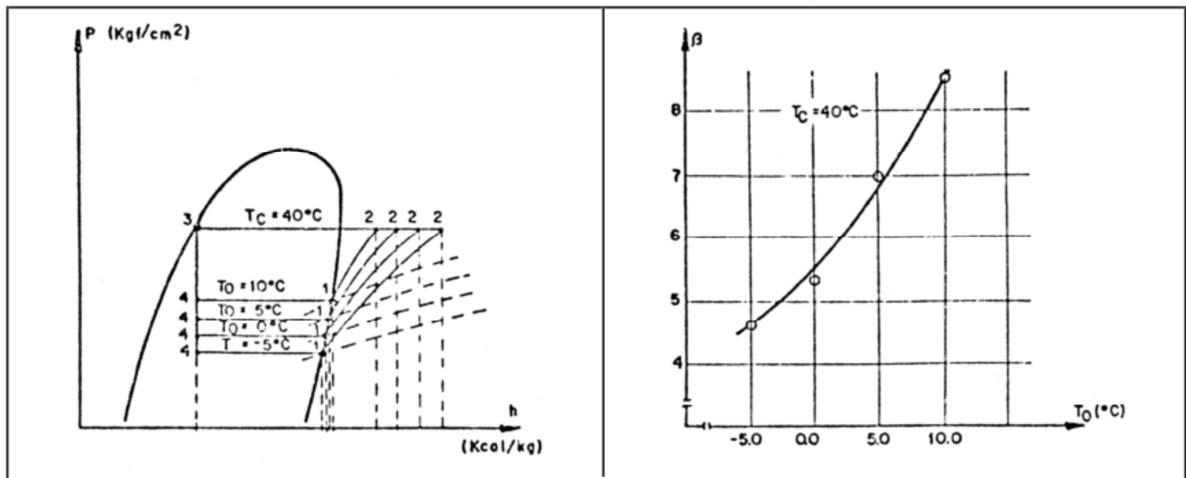


Figura A.4 - Influência da Temp. de Vaporização no Coeficiente de Eficácia do Ciclo (β). ELONKA et al [21]

A.2.2.2 Influência da temperatura de condensação na eficácia do ciclo

Assim como no caso da temperatura de vaporização, a influência da temperatura de condensação é mostrada num conjunto de ciclos onde apenas se altera a temperatura de condensação (). Esta análise é mostrada na Figura A5. Observe-se que para a mesma variação de temperatura (ΔT) (15 °C) em relação a temperatura de vaporização (), a variação da eficácia no caso da temperatura de condensação () é menor que no caso da variação de(.

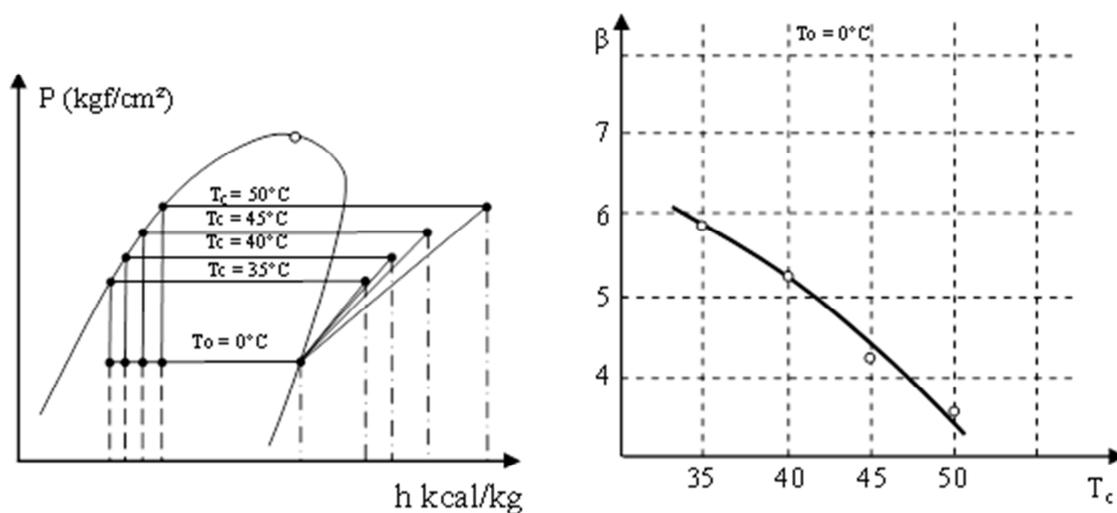


Figura A5 - Influência da Temp. de Condensação no Coeficiente de Eficácia do Ciclo (β) ELONKA et al [21]

APÊNDICE B - Sistema de transmissão de dados do tipo 1-wire™

O sistema 1-wire™ é uma rede de transmissão de dados, também chamada MicroLANT™, que realiza a comunicação digital entre um computador e dispositivos da série 1-wire™ (sensores, adaptadores, etc), atuando como escravos. Esta rede se baseia na tecnologia 1-wire™, de baixo custo, desenvolvida pela empresa Dallas Semiconductor. De acordo com AWTRY [22], o sistema 1-wire™ é constituído por três elementos: um computador com um programa de controle e gerenciamento das atividades, seguindo um protocolo específico de comunicação, dois ou três condutores (meio físico de comunicação) e dispositivos remotos da série 1-wire™. Neste tipo de transmissão de dados um único microcomputador pode ser conectado a múltiplos sensores em diversos tipos de topologias. Esta arquitetura torna o sistema 1-wire™ versátil e simples.

O sistema 1-wire™ apresenta um controle rígido, pois os dispositivos escravos só podem estabelecer comunicação através da requisição do equipamento mestre e não há nenhuma comunicação permitida entre os escravos conforme afirma DALLAS SEMICONDUCTOR [23]. Para que não haja falhas no funcionamento da rede de transmissão de dados que use diversos dispositivos semelhantes é necessária a existência de endereços ou códigos para a identificação de todos os dispositivos que atuem nesta rede. Segundo a DALLAS SEMICONDUCTOR [24], todo dispositivo 1-wire™ possui um código de identificação único de 64 bits que é gravado a laser no processo de fabricação em um chip de memória ROM (Read Only Memory) existente no interior de cada dispositivo. O código de identificação é constituído por 64 bits sequenciais sendo que os primeiros 8 bits representam a família à qual pertencem, os 48 bits seguintes correspondem ao número serial único e individual que endereça o dispositivo e os últimos 8 bits são um código de verificação de redundância cíclica relacionado aos 56 bits iniciais e indica a existência ou não de erro(s). Os dispositivos da série 1-wire™ possuem também, um circuito interno de proteção contra descargas eletrostáticas de até ± 10 kV.

B.1 Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação do sistema 1-wire™ opera com níveis lógicos convencionais CMOS/TTL (Complementary Metal Oxide Silicon / Transistor Transistor

Logic), onde o nível lógico zero é representado por uma tensão máxima de 0,8 V e o nível lógico um por uma tensão mínima de 2,2 V (Figura B-1). O dispositivo mestre como os escravos são configurados como transceptores viabilizando que os dados fluam, de maneira sequencial, em ambas as direções, sendo uma direção a cada vez (half-duplex).

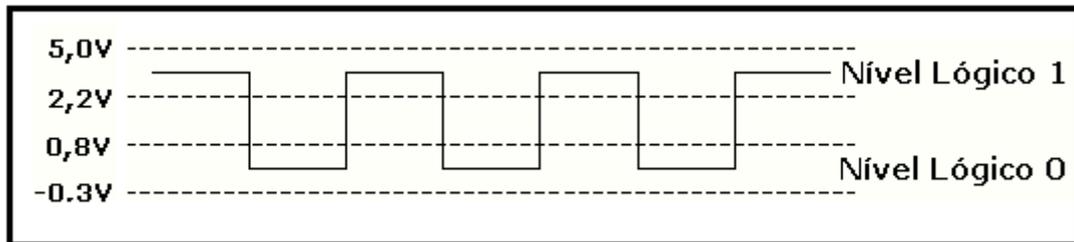


Figura B.1 - Níveis lógicos convencionais CMOS/TTL do protocolo de comunicação do sistema 1-wireTM.

A transmissão de dados no sistema 1-wireTM é síncrona, ou seja, cada um dos pulsos digitais que compõem o protocolo de comunicação, transmitidos na forma binária, são caracterizados por intervalos de tempo distintos. Esta transmissão sincronizada de dados é possível devido à existência de circuitos temporizadores internos nos dispositivos 1-wireTM capazes de gerar pulsos digitais predefinidos no protocolo de comunicação 1-wireTM. O sistema 1-wireTM utiliza um circuito equivalente a um resistor de 1.5 k Ω (resistor de polarização) para controlar a corrente na linha de dados e, desta maneira, elevar a tensão a fim de promover a transição do nível lógico zero para o nível lógico um. Além deste, outro circuito com um transistor de polarização MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), comandado pelo mestre, é responsável pela transição do nível lógico um para o nível lógico zero. Segundo AWTREY [22], os dados são transferidos dos sensores para o computador, normalmente, por meio de um cabo, sendo que neste cabo existem condutores específicos para comunicação, suprimento de energia e aterramento. Por definição, o sistema 1-wireTM possui um único condutor conectado a todos os dispositivos da série 1-wireTM, pois por convenção, o condutor de referência ou aterramento não é considerado. Existem duas formas de alimentação do sistema 1-wireTM, que pode ser de forma parasita ou por alimentação externa.

B.2 - Topologias das redes 1-wire™

Podem-se estruturar as redes 1-wire™ de maneiras distintas quanto à topologia, ou seja, a disposição física dos dispositivos 1-wire™ ao longo dos condutores e ao número e comprimento das ramificações. Desta forma a DALLAS SEMICONDUCTOR[23] classificou de acordo com a distribuição dos escravos ao longo do comprimento dos condutores que incluem as redes 1-wire™.

B.2.1 - Topologia linear

A topologia linear das redes 1-wire™ é configurada em uma única linha que tem início no mestre e se prolonga até o último escravo da rede (Figura B-2). Nesta topologia pode haver ramificações desde que sejam de comprimento inferior a 3 metros.

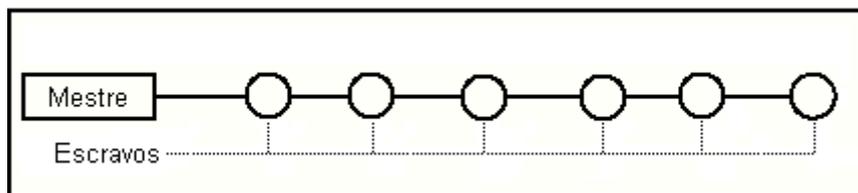


Figura B.2 - Topologia linear da rede 1-wire™.

B.2.2 - Topologia ramificada

Na topologia ramificada, as redes 1-wire™ são compostas de uma linha principal que tem início no mestre que se estende até o último escravo conectado à rede. Os demais dispositivos são ligados à linha principal por meio de ramificações de comprimento superior a 3 metros (Figura B-3).

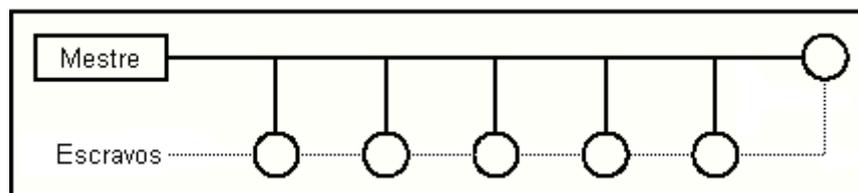


Figura B.3 - Topologia ramificada da rede 1-wire™.

Devido a impedância gerada por cada ramificação conectada na linha principal da rede pode haver problemas na comunicação entre os dispositivos conectados a essa rede.

B.2.3 - Topologia estrela

Na topologia estrela as redes 1-wire™ a divisão das redes ocorre bem próximo à conexão com o mestre e se avançam por meio de ramificações múltiplas de diversos comprimentos contendo escravos ao longo ou ao final das mesmas (Figura B-4).

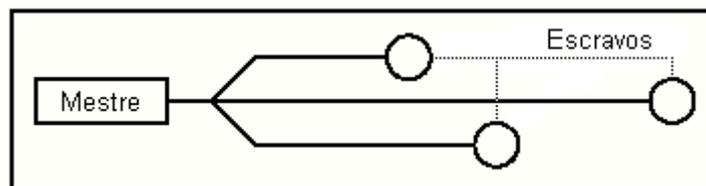


Figura B.4 - Topologia estrela da rede 1-wire™.

A confiabilidade das redes 1-wire™, na topologia estrela é baixa. A junção de várias ramificações é vista pelo mestre como um valor de impedância bem maior o real, podendo causar problemas devido a reflexões.

Segue-se a relação dos parâmetros que podem comprometer o desempenho da rede 1-wire™.

B.3 Taxa morta

A taxa morta, segundo a DALLAS SEMICONDUCTOR[23], corresponde à taxa na qual a linha de dados da rede 1-wire™ é levada do nível lógico um para o nível lógico zero. Devido ao tempo de resposta rápido e à baixa impedância do transistor de polarização, o tempo do sinal será da ordem de microssegundos. Se a transição ocorrer em um tempo menor que o necessário para atravessar os condutores da rede 1-wire™, as reflexões na linha de dados podem causar interrupção na comunicação.

B.4. Características dos condutores

A qualidade dos condutores que interligam o processador e os dispositivos 1-wireTM são os principais responsáveis pelo desempenho do sistema 1-wireTM. A escolha dos condutores para serem utilizados na rede 1-wireTM não é muito crítica desde que as distâncias sejam pequenas (menores que 30m) e que o número de dispositivos seja reduzido. Porém, para distâncias maiores, é necessária uma escolha mais criteriosa, pois os efeitos relacionados às propriedades físicas e elétricas dos condutores aumentam, gerando a necessidade de uma seleção mais criteriosa conforme afirma DALLAS SEMICONDUCTOR[23]. As principais propriedades apresentadas pelos condutores são de resistência, indutância e capacitância, definidas em função da geometria, comprimento e espaçamento dos condutores, além do material isolante ao redor deles. Especificamente, a resistência dos condutores reduz os ruídos na linha de dados nos instantes em que a mesma estiver em nível lógico zero (valores máximos de 100Ω). A indutância pode de gerar variações na tensão que muitas vezes causam erros nos dados transmitidos, até mesmo nos dispositivos mais próximos do mestre e dentre as características elétricas mencionadas, a capacitância é a que causa os maiores problemas na transmissão de dados no sistema 1-wireTM. A capacitância na rede 1-wireTM aumenta com o aumento de dispositivos 1-wireTM e ou com a capacitância dos condutores. A capacitância dos condutores, que podem variar de 30pF/m até 100pF/m, cresce com o aumento do comprimento dos mesmos. O incremento da capacitância na rede faz com que o tempo de transição do nível lógico zero para o nível lógico um aumente. Cada dispositivo 1-wireTM, segundo a DALLAS SEMICONDUCTOR[23] apresenta características próprias relacionadas à capacitância de entrada (C_{entra}), à corrente de descarga (I_{desc}), ao circuito de alimentação parasita (D_i , R_i , C_{carga}) e à corrente de operação (I_{op}), sendo que esta última é igual a $10\mu A$ durante a comunicação (Figura B-5). A capacitância de entrada de cada dispositivo 1-wireTM (30pF) contribui para o acréscimo da carga capacitiva na rede 1-wireTM. Porém, o valor de 800pF de capacitância da alimentação parasita apenas existe em níveis de tensão acima de 2,8V. Portanto, a capacitância do circuito de alimentação parasita pode ser ignorada, pois a rede está operando no limiar dos 2,2V para o nível lógico um.

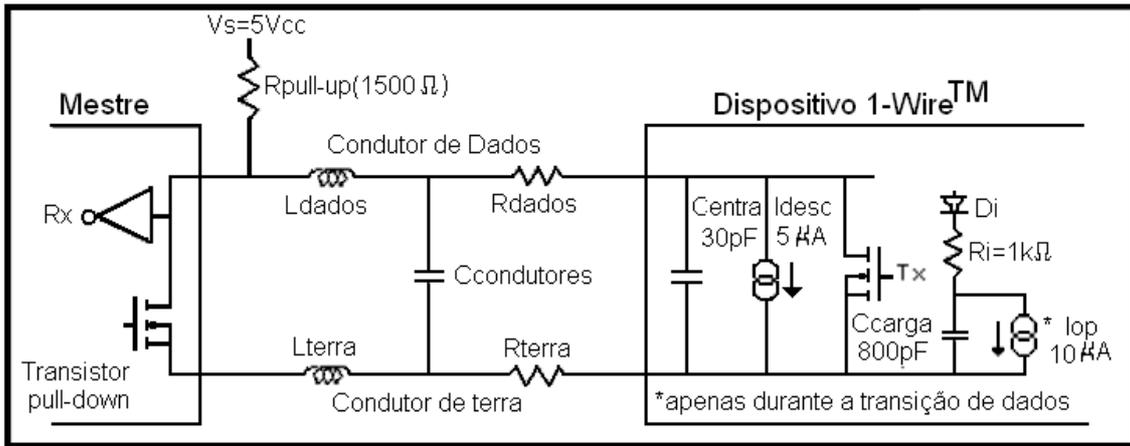


Figura B.5 - Circuito equivalente ao sistema 1-wire™ com um dispositivo 1-wire™ conectado ao mestre (computador) por meio de dois condutores. Fonte (DALLAS SEMICONDUCTOR 2014a).

Se o resultado do produto entre a capacitância total (incluindo a capacitância de entrada dos dispositivos 1-wire™ e a dos condutores) e o valor do resistor de polarização (pull-up) for uma Constante de Tempo (RC) que exceda o intervalo de tempo definido pelo protocolo de comunicação 1-wire™ para um determinado bit, a comunicação é interrompida. Por esse motivo, não devemos aterrar os condutores que não estejam sendo usados, pois o aterramento pode incrementar a capacitância de maneira substancial, dificultando ou impossibilitando, a elevação da linha de dados para o nível lógico um, e provocando, conseqüentemente, erros nos dados transmitidos. O tempo de transição do nível lógico zero para o nível lógico um pode ser melhorado reduzindo o valor do resistor de polarização, diminuindo o número de dispositivos 1-wire™ conectados na rede ou utilizando condutores de baixa capacitância por metro. O valor do resistor de polarização, não deve ser menor que 1500Ω. A redução deste valor incrementa a tensão relacionada ao nível lógico zero, reduzindo a imunidade da rede a ruídos. DALLAS SEMICONDUCTOR[24]

APÊNDICE C - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante o período de realização do trabalho, foram feitas medições de temperaturas a cada 2 minutos em todos os sensores da sonda e esses valores foram adquiridos e armazenados através uma placa de aquisição de dados. Essa placa de aquisição de dados é composta pelos seguintes componentes: um microcontrolador PIC 18F4520, um clock PCF8583 para armazenar data e hora, um cartão de memória (SD card), um visor 4x20 e sensores digitais de temperatura DS18B20. Os sensores de temperatura são ligados em um único pino do PIC de modo que podem ser ligados vários sensores. Na placa de aquisição de dados foram feitas conexões para até 15 sensores de temperatura. Os dados medidos são armazenados em arquivos com formato txt criados no cartão SD.

C.1 Diagrama de blocos

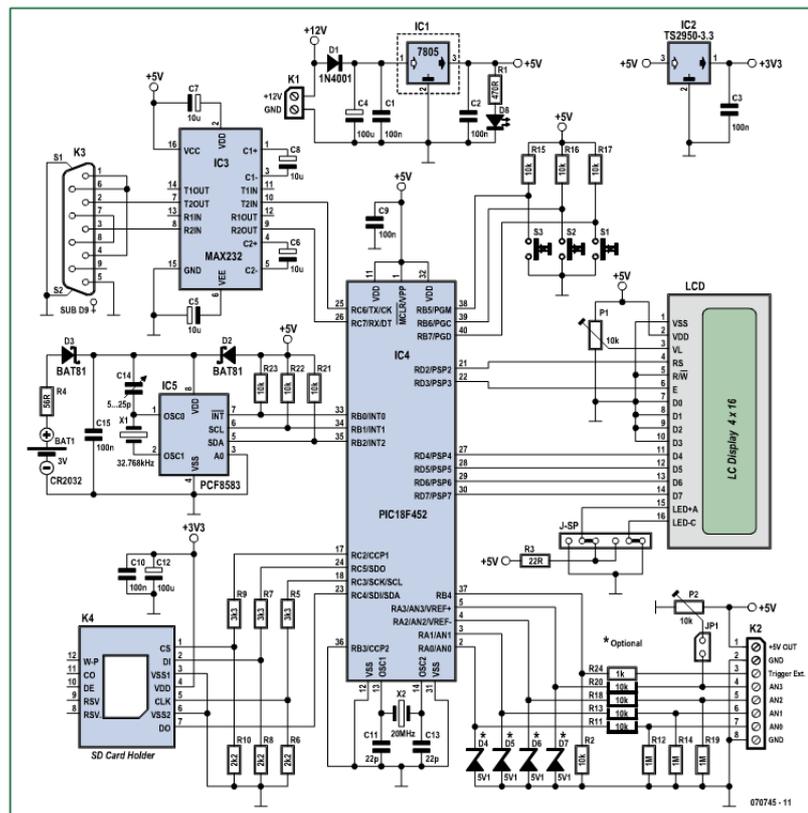


Figura C.1 Diagrama esquemático placa de aquisição de dados

C.2 Código fonte

O algoritmo usado na programação da placa de aquisição de dados foi escrito em linguagem C, utilizando o compilador MikroC da Mikro Elektronika. O código-fonte é bastante intuitivo e foi montado a partir de rotinas usuais da programação de microprocessadores da família PIC.

```
// Software I2C connections
sbit Soft_I2C_Scl    at RC6_bit;
sbit Soft_I2C_Sda    at RC7_bit;
sbit Soft_I2C_Scl_Direction at TRISC6_bit;
sbit Soft_I2C_Sda_Direction at TRISC7_bit;
// End Software I2C connections
// LCD module connections
sbit LCD_RS at LATD2_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_EN at LATD3_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D4 at LATD4_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D5 at LATD5_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D6 at LATD6_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_D7 at LATD7_bit; // for writing to output pin always use latch (PIC18 family)
sbit LCD_RS_Direction at TRISD2_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISD3_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISD4_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISD5_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISD6_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISD7_bit;
// End LCD module connections
// MMC module connections
sbit Mmc_Chip_Select    at LATC0_bit;
sbit Mmc_Chip_Select_Direction at TRISCO_bit;
// eof MMC module connections
#define AreaPV 0.454
#define NumADs 5
char filename[16] = "00-00-10.txt";

unsigned int dayant=0, minant=60, clktime[6]; //seconds, minutes, hours, day, month, year; // Global date/time variables
unsigned long  ad[NumADs];
typedef struct romCode{
    char codigo[3];
} RomCode;
#define numSensors 10
RomCode romCodeT [numSensors] =
{
    {0xff, 0x67, 0x8b},
    {0xa, 0x3d, 0x3a},
```

```

{0xfc, 0x76, 0x63},
{0xf4, 0x3d, 0x5b},
{0x67, 0x79, 0x45},
{0xb3, 0x78, 0x90},
{0x93, 0xa9, 0xb5},
{0x3e, 0xa9, 0xa3},
{0x9d, 0x81, 0x60},
{0xf7, 0x3d, 0x2}
};
unsigned int T[numSensors], Tfrac[numSensors];
void Read_Time() {
    int i;
    Soft_I2C_Start();      // Issue start signal
    Soft_I2C_Write(0xA0);  // Address PCF8583, see PCF8583 datasheet
    Soft_I2C_Write(2);    // Start from address 2
    Soft_I2C_Start();     // Issue repeated start signal
    Soft_I2C_Write(0xA1); // Address PCF8583 for reading R/W=1
    for(i=5;i>1;i--)
        clktime[i] = Soft_I2C_Read(1); /* // Read seconds byte
    clktime[4] = Soft_I2C_Read(1); // Read minutes byte
    clktime[3] = Soft_I2C_Read(1); // Read hours byte
    clktime[2] = Soft_I2C_Read(1); // Read year/day byte */
    clktime[1] = Soft_I2C_Read(0); // Read weekday/month byte
    Soft_I2C_Stop();      // Issue stop signal
}
//----- Formats date and time
void Transform_Time() {
    int i;
    clktime[0] = (clktime[2] & 0xC0) >> 6; // Transform year
    clktime[1] = ((clktime[1] & 0x10) >> 4)*10 + (clktime[1] & 0x0F); // Transform month
    clktime[2] = ((clktime[2] & 0x30) >> 4)*10 + (clktime[2] & 0x0F); // Transform day
    clktime[3] = ((clktime[3] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[3] & 0x0F); // Transform hours
    clktime[4] = ((clktime[4] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[4] & 0x0F); // Transform minutes
    clktime[5] = ((clktime[5] & 0xF0) >> 4)*10 + (clktime[5] & 0x0F); // Transform seconds
    for(i=1;i<6;i++) if(clktime[i]>99) clktime[i]=99;
    if(clktime[0]>96) clktime[0]=96;
}
//----- Output values to LCD
void Display_Date()
{
    char str[9];
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    sprintf(str, "%2d/%2d/1%d", clktime[2], clktime[1], clktime[0]+3);
    Lcd_Out(1,1, str);
    sprintf(str, "%2d:%2d:%2d", clktime[3], clktime[4], clktime[5]);
    Lcd_Out(3,1, str);
    delay_ms(3000);
}

```

```

void LCD_Displ()
{
    unsigned char lcd[] = "Nx: 00000";//,ch1;//,ch2;
    int j;
    //Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    for(j=0;j<(NumADs/2)+1;j++){
        sprintf(lcd, "N%d: %.5d", j+1, ad[2*j]);
        //
        // Display result on LCD
        //
        Lcd_Out(j+1,1,lcd); // Output to LCD
    }
}

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

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

        T[i] = Ow_Read(&PORTB, 7);
    }
}

```

```

    T[i] = (Ow_Read(&PORTB, 7) << 8) + T[i];
    Delay_ms(300);
}
}

void Display_Temperature(int i) {
//const unsigned short RES_SHIFT = TEMP_RESOLUTION - 8;
//unsigned int temp_whole; //, temp_frac;
int j, k;
char txt[] = "Tx: 000.0000°C";
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);          // Clear LCD
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);    // Turn cursor off
if(numSensors<4) k = numSensors;
else k = 4;
//Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
for(j=i;j<i+k;j++){
if(j>=numSensors) break;
// extract temp fraction and convert it to unsigned int
Tfrac[j] = T[j];// << (4-RES_SHIFT);
Tfrac[j] &= 0x000F;
Tfrac[j] *= 625;
// extract temp_whole
T[j] = T[j] >> 4;//RES_SHIFT;
if(T[j]>999) T[j]=999;
sprintf(txt, "T%d: %.3d%.4d",j+1, T[j], Tfrac[j]);
Lcd_Out(j-i+1, 1, txt);

}
delay_ms(3000);
}
void Create_File()
{
    dayant = clktime[2];
    sprintf(filename, "%2d-%2d-1%d.txt", clktime[2], clktime[1], clktime[0]+3);
    // Initialise the SPI bus
    //Spi1_Init_Advanced(_SPI_MASTER_OSC_DIV4, _SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE,
    //_SPI_CLK_IDLE_LOW, _SPI_LOW_2_HIGH);
    Mmc_Fat_Assign(filename,0xA0);
}
#define Nstr 101
void Send_Data()
{
    char str[Nstr];
    unsigned int lux;
    lux = PORTC / 0b101;
    lux = lux % 0b10;
    //unsigned int i, ana[3];

```



```
 */  
void main()  
{  
    Init_Main();  
    // Program loop  
    //  
    for(;;) // Endless loop  
    {  
        Read_Time();    // Read time from RTC(PCF8583)  
        Transform_Time(); // Format date and time  
        Display_Date(); // Prepare and display on LCD  
        //delay_ms(3000);  
        //read_AD();  
        //LCD_Displ();  
        //delay_ms(3000);  
        read_temp();  
        Display_Temperature(0);  
        Display_Temperature(4);  
        //Display_Temperature(8);  
        // Create file on SD Card  
        if(clktime[2]!=dayant) Create_File();  
        // Write SD Card  
        if( /*clktime[4]%5==0 && */clktime[5]!=minant) Send_Data();  
    }  
}
```

ANEXOS

Os anexos abaixo mostram as principais especificações retiradas dos datasheets dos componentes que foram utilizados durante este estudo.

ANEXO 1 - DATASHEET DO SENSOR DS18B20

DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

DESCRIPTION

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

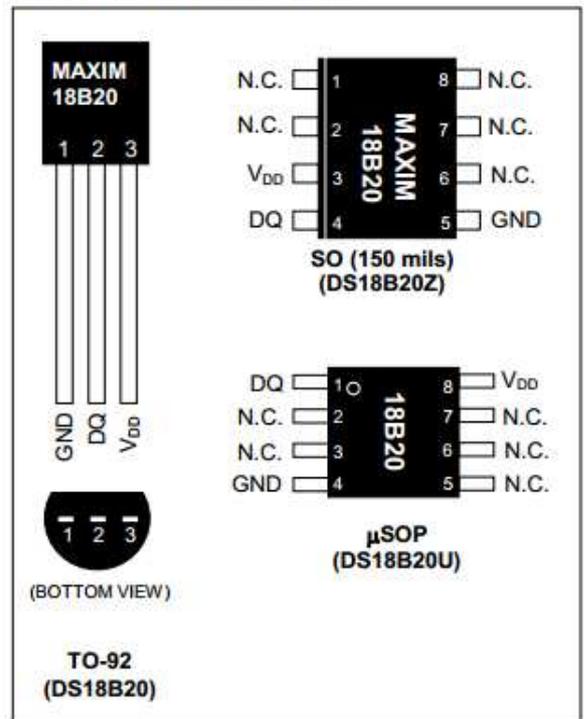
Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature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

FEATURES

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

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

PIN CONFIGURATIONS



1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

ANEXO 2 - DATASHEET DO PIC18F542



PIC18FXX2

28/40-pin High Performance, Enhanced FLASH Microcontrollers with 10-Bit A/D

High Performance RISC CPU:

- C compiler optimized architecture/instruction set
 - Source code compatible with the PIC16 and PIC17 instruction sets
- Linear program memory addressing to 32 Kbytes
- Linear data memory addressing to 1.5 Kbytes

Device	On-Chip Program Memory		On-Chip RAM (bytes)	Data EEPROM (bytes)
	FLASH (bytes)	# Single Word Instructions		
PIC18F242	16K	8192	768	256
PIC18F252	32K	16384	1536	256
PIC18F442	16K	8192	768	256
PIC18F452	32K	16384	1536	256

- Up to 10 MIPs operation:
 - DC - 40 MHz osc./clock input
 - 4 MHz - 10 MHz osc./clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier

Peripheral Features:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupt pins
- Timer0 module: 8-bit/16-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1 module: 16-bit timer/counter
- Timer2 module: 8-bit timer/counter with 8-bit period register (time-base for PWM)
- Timer3 module: 16-bit timer/counter
- Secondary oscillator clock option - Timer1/Timer3
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules. CCP pins that can be configured as:
 - Capture input: capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns ($T_{cy}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{cy})
 - PWM output: PWM resolution is 1- to 10-bit, max. PWM freq. @: 8-bit resolution = 156 kHz
10-bit resolution = 39 kHz
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module, Two modes of operation:
 - 3-wire SPI™ (supports all 4 SPI modes)
 - I²C™ Master and Slave mode

Peripheral Features (Continued):

- Addressable USART module:
 - Supports RS-485 and RS-232
- Parallel Slave Port (PSP) module

Analog Features:

- Compatible 10-bit Analog-to-Digital Converter module (A/D) with:
 - Fast sampling rate
 - Conversion available during SLEEP
 - Linearity ≤ 1 LSB
- Programmable Low Voltage Detection (PLVD)
 - Supports interrupt on-Low Voltage Detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR)

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced FLASH program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory
- FLASH/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own On-Chip RC Oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options including:
 - 4X Phase Lock Loop (of primary oscillator)
 - Secondary Oscillator (32 kHz) clock input
- Single supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low power, high speed FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption:
 - < 1.6 mA typical @ 5V, 4 MHz
 - 25 μ A typical @ 3V, 32 kHz
 - < 0.2 μ A typical standby current