



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ALIMENTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO
MICROCONTROLADO PARA A DETERMINAÇÃO DA
CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS**

ALEX SANDRO OLIVEIRA DE ALMEIDA

**ITAPETINGA - BAHIA
2008**

ALEX SANDRO OLIVEIRA DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO MICROCONTROLADO PARA A
DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS**

Dissertação apresentada à
Universidade Estadual do Sudoeste
da Bahia, como parte das exigências
do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos, Área de
Concentração em Engenharia de
Processos de Alimentos, para
obtenção do título de “Mestre”.

Orientador:
Modesto Antonio Chaves

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Área de Concentração Engenharia de Processos de Alimentos

Campus de Itapetinga – BA

TERMO DE APROVAÇÃO

Título: “DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO MICROCONTROLADO PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS”.

Autor: ALEX SANDRO OLIVEIRA DE ALMEIDA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de concentração em **Engenharia de Processos de Alimentos**, pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Modesto Antonio Chaves - UESB
Presidente

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior - UNICAMP

Prof. Dr. Leizer Schnitman - UFBA

Data da defesa: 20/03/2008

UESB – Campus Juvino Oliveira, Praça Primavera nº 40 – Telefone: (77) 3261-8629
Fax: (77) 3261-8701 – Itapetinga – BA – CEP: 45.700-000 – E-mail: ppgeal@uesb.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Modesto, pela orientação recebida, pela paciência, confiança e pelo incentivo dado durante a realização do projeto.

Ao amigo Marcos Nazareth, pela enorme ajuda dada para a aquisição de um componente importante para a construção do aparelho.

A professora Alessandra Almeida Castro, da Universidade Federal de Sergipe, por nos ter fornecido o KDII para a realização dos testes de calibração do aparelho.

As amigas Riuvania e Elen, pela grande ajuda recebida durante a fase de testes do instrumento.

Aos professores Vivaldo e Leizer, por aceitarem fazer parte da banca examinadora.

*Orientador: Modesto Antonio chaves, *DSc.*, UESB

RESUMO

ALMEIDA, A. S. O de. DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO MICROCONTROLADO PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS. Itapetinga – BA: UESB, 2008. 61p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos – Engenharia de Processos de Alimentos).*

Conhecer o valor da condutividade térmica dos alimentos é muito importante para o correto dimensionamento de equipamentos que utilizam o frio como princípio básico para a conservação e para os dispositivos que se baseiam em tratamentos térmicos, evitando assim, o desperdício de energia e para garantir a qualidade dos produtos, desta forma, se faz necessário desenvolver métodos e ou dispositivos para realizar este tipo de análise de maneira simples, rápida e barata. No presente trabalho, desenvolveu-se um aparelho de fácil utilização e de baixo custo, capaz de determinar a condutividade térmica de alimentos, tendo como base a utilização do método transiente da sonda quente. O dispositivo construído possui uma agulha hipodérmica de 100 mm de comprimento por 1,5 mm de diâmetro, na qual foram inseridos cuidadosamente um termistor, para a leitura da temperatura e um fio de níquel cromo, responsável pelo aquecimento da sonda. O sistema construtivo do aparelho está baseado na utilização de um microcontrolador Basic Stamp, o qual controla todos os eventos relacionados às análises, como a leitura da temperatura ao longo do tempo, aquecimento da agulha, equacionamento dos dados de temperatura coletados, além de externar o resultado das análises através de um display de cristal líquido, dessa maneira, o equipamento desenvolvido não necessita de nenhum tipo de dispositivo adicional para a realização das análises, como microcomputador, placa de aquisição de dados dentre outros. O protótipo desenvolvido foi calibrado de acordo com dados presentes na literatura referentes à glicerina P.A., e em relação aos valores da condutividade térmica de três alimentos: ketchup, leite condensado e creme de leite UHT. As condutividades térmicas destes alimentos foram determinadas com o uso do KDII, equipamento de uso comercial já consagrado, sendo que os resultados obtidos com o protótipo, foram equivalentes ao do aparelho comercial.

Palavras-chave: alimentos, condutividade térmica, microcontrolador.

*Orientador: Modesto Antonio chaves, DSc., UESB

ABSTRACT

ALMEIDA, A. S. O. de. DEVELOPMENT OF A MICROCONTROLLED INSTRUMENT TO DETERMINATE THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE FOOD. Itapetinga – BA: UESB, 2008. 61p. (Dissertation – Food Engineering Master Degree – Food Processing Engineering).*

The knowledge of the food thermal conductivity value is very important to the right dimensioning of the equipments that use cold as the basic principle to conservation and to the gadgets that are bases on thermal treatments, avoiding energy waste and to assure the products quality thus to develop methods and/or devices to accomplish this kind of analysis in a simple, quick and cheap way. This project developed a device of easy utilization and low cost, that is able to determine the thermal conductivity of food based on the utilization of the transient method of hot wire. The device has a hypodermic needle of 100 mm length and 1.5 mm in diameter, where were carefully inserted a thermistor to read the temperature and a wire of nickel chromium, that is responsible for the probe heating. The constructive system of the device is based on the use of a Basic Stamp microcontroller which controls all the analysis related events, like the reading of the temperature along the time, needle heating, equationing the collected temperature data and show the analysis results through a display of liquid crystal; thus the developed equipment doesn't need any kind of extra device to accomplish the analysis, like computers, data acquisition and others. The developed prototype was calibrated according to presented data in the literature referred to glycerin P.A. and related to the values of thermal conductivity of three kinds of food: ketchup, condensed milk and UHT cream. The thermal conductivity of these were determinate using the KDII, a known device in commercial use, whereas the obtained results with the prototype were similar to the commercial device.

Keywords: food, thermal conductivity, microcontroller.

*Advisor: Modesto Antonio chaves, *DSc.*, UESB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Esquema da metodologia da Sonda Quente.....	14
Figura 2 -Gráfico relacionando tempo e temperatura durante análise da condutividade térmica pelo método da sonda quente.....	17
Figura 3 -O KDII.....	18
Figura 5 -Módulo Basic Stamp II.....	21
Figura 6 -Esquema de ligação serial entre o PC e o Basic Stamp.....	22
Fonte: PARALLAX INC, 1994.....	22
Figura 7 -Módulo para termopar DS2760.....	23
Figura 8 -Circuito integrado MAX 6674.....	24
Figura 9a -Dimensões em milímetros do termistor B57540G0103J.....	24
Figura 9b -Tamanho do termistor B57540G0103J.....	25
Figura 10 -Circuito para a leitura da condutância elétrica.....	25
Fonte: PARALLAX INC, 1999.....	25
Figura 11 -Circuito integrado NE555.....	25
Figura 12 -Circuito modificado para leitura do termistor.....	26
Figura 14 -Co-processador aritmético Pak-II.....	28
Figura 15 -Circuito com o co-processador aritmético <i>Pak-II</i>	28
Figura 16 -Circuito responsável pelo aquecimento da sonda.....	29
Figura 17 -Circuito completo.....	31
Figura 18 -Esquema do interior da sonda.....	34
Figura 19 -Sonda completa.....	35
Figura 20 -Vista explodida da sonda.....	35
Figura 21 -Dimensões da sonda.....	36
Figura 22 -Exemplo de utilização da sonda.....	36
Figura 24 -Display Serial TS-216.....	37
Figura 25 -Piezo speaker.....	38
Figura 26 -Interruptor de pressão.....	38
Figura 27 -Foto do aparelho completo.....	38
Figura 28b -Mensagem de erro.....	39
Figura 29 -“Insira sensor aperte tecla 1 ”.....	40
Figura 30 -“Estabilizando, aguarde...”.....	40
Figura 31 -“Analisando, aguarde”.....	40
Figura 32 -Resultado de análise.....	41
Figura 33 -Gráfico comparativo entre frequência de oscilação e temperatura.....	41
Figura 34 -Curva demonstrando os intervalos assumidos para calibração.....	42
Figura 35 -Equação de regressão, intervalo de confiança e de previsão para os valores obtidos com a sonda protótipo e o KDII.....	45
Figura 36 -Gráfico de resíduos padronizados entre os valores obtidos com a sonda protótipo e o KDII.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Características do Basic Stamp	22
Tabela 2 -Leituras do KDII e do protótipo para diferentes produtos em diferentes temperaturas (valores médios de leituras em triplicata).....	43
Tabela 3 -Resultados da análise de regressão para os valores obtidos com os dois aparelhos.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1. Condutividade térmica	10
2.1.1. Métodos de estado estacionário.....	10
2.1.2. Método em regime transiente	11
2.2. Microcontroladores.....	18
2.2.1. O Microcontrolador BASIC STAMP.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Sistemas dedicados do aparelho.....	23
3.1.1. Leitura de temperatura.....	23
3.1.2. Aquecimento da agulha:	29
3.2.1. Sonda completa	30
3.2.2. Circuito completo.....	31
3.2.3. Determinação do intervalo de medição	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1. Montagem final da sonda	34
4.2. Unidade de saída do aparelho.....	37
4.3. Botões de controle.....	38
4.4. Aparelho pronto	38
4.5. Operação do aparelho	39
4.6. Calibração do Termistor	41
4.7. O intervalo de medição	42
4.8. Calibração da sonda com o KDII.....	42
5. CONCLUSÕES	47
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
APÊNDICE A	51
APÊNDICE B.....	52
APÊNDICE C.....	53

1. INTRODUÇÃO

A produção de alimentos seguros é a maior das missões da moderna indústria de alimentos, tendo em vista que a ingestão de alimentos deteriorados e ou contaminados pode facilmente causar danos à saúde ou mesmo provocar a morte. Uma das maneiras para se conseguir alimentos seguros é por meio de tratamento térmico, o qual além de destruir microrganismos potencialmente patogênicos, inativa enzimas que provocam a deterioração rápida do produto. Estes efeitos garantem que o alimento permanecerá em perfeitas condições de consumo até o final do seu prazo de validade. Outra forma de garantir a sanidade dos produtos alimentícios é pela utilização do frio, geralmente, utiliza-se esta técnica em associação com outra, principalmente para aumentar a vida de prateleira dos produtos, já que os efeitos do frio sobre os alimentos estão relacionados à ações bacteriostáticas e de redução da velocidade de reações degradativas desenvolvidas principalmente pelo conteúdo enzimático presente no alimento.

Atualmente, existem várias maneiras de se fazer o tratamento térmico e conservação de alimentos pelo emprego do frio. O mercado dispõe de uma infinidade de equipamentos projetados para pasteurizar, esterilizar, evaporar, secar, resfriar e congelar alimentos. No projeto de equipamentos, as características de cada alimento devem ser devidamente conhecidas, pois somente desta maneira, os mesmos serão corretamente dimensionados, evitando assim tratamentos inadequados, os quais poderão interferir na qualidade do produto e ou aumentar consideravelmente os gastos energéticos. Projetos inadequados ou que não observem estes itens; podem facilmente interferir ou mesmo inviabilizar qualquer empreendimento industrial.

Dentre as características dos alimentos que estão relacionadas aos tratamentos térmicos e ou emprego de frio, podemos destacar a condutividade térmica que exprime a habilidade que cada substância possui para conduzir calor. Na literatura podem-se encontrar valores tabelados da condutividade térmica de vários alimentos, entretanto, como se trata de materiais de origem biológica, existe muita variação em sua composição, como por exemplo, nos teores de umidade, gorduras, arranjo das fibras, época de colheita dentre outras. Essas variações podem afetar sensivelmente a condutividade térmica dos mesmos. Outra dificuldade no uso de valores tabelados esta relacionada à temperatura de referência, ou seja, cada valor de condutividade térmica tabelada foi encontrado em uma temperatura específica, sendo assim, caso a temperatura do processo de interesse seja diferente do valor tabelado, perderão existir grandes variações no valor da condutividade térmica em relação ao valor tabelado. Por último, e talvez o maior dos problemas em se trabalhar com valores tabelados de condutividade térmica, é a existência de uma infinidade de alimentos e formulações para os quais não se conhece a sua

condutividade térmica, isto faz com que sejam utilizadas, aproximações muitas vezes não satisfatórias, desta importante propriedade.

A realização de medições da condutividade térmica como descrito por Tandini *et al.* (2005) envolve uma quantidade considerável de itens, o que a torna uma operação laboriosa, lenta e por vezes, complicada. Para se determinar a condutividade térmica de maneira mais rápida e fácil, é necessário dispor de um equipamento construído exclusivamente para esta finalidade.

Atualmente, existem aparelhos, fabricados fora do Brasil, para medição da condutividade térmica, mas os custos para a aquisição muitas vezes são proibitivos, sendo assim, o desenvolvimento de um equipamento desta natureza no Brasil demonstra o caráter inovador deste projeto.

A base do presente trabalho foi a utilização de microcontroladores na construção de um aparelho para este tipo de análise, com isso desenvolveu-se um dispositivo de baixo custo, portátil, automático e que não utiliza microcomputador, módulo de aquisição de dados e demais itens necessários para a realização dos ensaios.

Os resultados obtidos pelo aparelho desenvolvido foram comparados com os resultados determinados por um KDII, equipamento fabricado pela Decagon Devices e que tem princípio de funcionamento semelhante.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Condutividade térmica

Atualmente, existem vários métodos de se medir a condutividade térmica dos materiais. Estes métodos podem ser classificados em métodos de estado estacionário e métodos de estado não estacionário. Os métodos estacionários são mais fáceis de serem realizados, entretanto, demandam relativamente grande quantidade de tempo para que seja atingido o regime estacionário para a realização da análise (MOURA, 2003). As metodologias baseadas no estado transiente, apesar de serem mais difíceis de se realizar, são mais adequadas para alimentos, pois as medições são realizadas em poucos minutos, evitando assim alterações na amostra em consequência de sua atividade microbiológica e ou química, já que estes materiais são de natureza biológica (FONTANA *et al.* 1999).

2.1.1. Métodos de estado estacionário

Esta metodologia de análise está baseada diretamente na Lei da condução de Fourier (GELDER, 1998):

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Sendo:

Q = fluxo de calor (W/m^2)

k = condutividade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$)

A = área de perpendicular ao fluxo de calor (m^2)

ΔT = diferença de temperatura ($^\circ C$)

Δx = espessura do volume de controle (m)

Neste método, a condutividade térmica do material é expressa em função da temperatura superficial, do fluxo de calor e das dimensões da amostra a ser analisada. São utilizados volumes de controle baseados em formas geométricas simples, como: esferas, cilindros e cubos. Desta maneira, a determinação da condutividade térmica será simplificada, desde que a amostra a ser analisada tenha características geométricas semelhantes às dos volumes de controles (GELDER, 1998).

Na literatura são encontradas várias metodologias para a determinação da condutividade térmica baseadas no regime estacionário, dentre elas, podem-se destacar duas:

- a. Chapa quente protegida: Este método é o mais utilizado na determinação da condutividade térmica de materiais isolantes ou de baixos índices de condução

térmica (MOHSENIN, 1980). O princípio da técnica baseia-se em se fornecer calor, em fluxo constante, à amostra analisada. Usa-se para tal, uma placa aquecedora capaz de fornecer potência elétrica conhecida e constante para a amostra. A placa possui termopares instalados em suas faces. O calor então, é conduzido através da amostra até ser dissipado por uma placa dissipadora de calor instalada na outra face da mesma. Esta placa dissipadora está a uma temperatura mais baixa, isto garante a existência do fluxo de calor. Nas laterais da amostra, existem anéis isolantes que evitam a ocorrência de perdas de calor através das laterais do aparato, ou seja, é razoável admitir que todo o calor gerado pela placa aquecedora, é dissipado pela placa dissipadora, associando um fluxo de calor unidirecional e perpendicular às faces da amostra. Desta maneira, conhecendo-se a geometria da amostra, a diferença de temperatura entre as faces e o calor dissipado pela placa aquecedora, pode-se determinar a condutividade térmica do material, através da aplicação direta da Lei de Fourier para condutividade térmica (SIMIONE, 2005).

- b. Fluxo de calor radial: Esta metodologia é empregada geralmente para materiais granulares e pós. O método utiliza um cilindro dotado de um fio aquecedor, instalado exatamente em seu centro geométrico, capaz de fornecer potência elétrica conhecida e constante ao longo de todo o seu comprimento. No interior do cilindro, também são instalados dois sensores de temperatura, posicionados em pontos distintos e devidamente conhecidos. Assim que se instala o estado térmico estacionário, a condutividade térmica será determinada através da diferença de temperatura entre os dois pontos da amostra e da potência de aquecimento, uma vez que estes valores poderão ser aplicados diretamente à da Lei de Fourier para coordenadas cilíndricas (GELDER, 1998).

2.1.2.Método em regime transiente

Este método de medida baseia-se na aquisição de perfis de temperatura ao longo de um tempo predefinido (MOSHESIN, 1980). Além do tempo de análise requerido, ser muito menor do que no regime estacionário, o que favorece a utilização do método como método de rotina, as metodologias para regimes transientes possuem também a vantagem de poderem ser utilizadas para determinar outras propriedades termofísicas, como a difusividade e capacidade térmica volumétrica (GELDER, 1998). Métodos transientes podem ser utilizados em uma grande quantidade de matérias, entretanto, os mesmos são menos exatos que os métodos de estado estacionário, quando se trata de materiais secos (MOSHESIN, 1980).

Entre as técnicas para determinação da condutividade térmica, através do regime transiente, destacam-se:

- a. Pulso de calor com agulhas duplas: Esta técnica consiste de duas agulhas de prova, paralelas, separadas por uma distância conhecida. Uma agulha contém um fio aquecedor, normalmente de níquel cromo, e a outra um sensor de temperatura. Após a inserção deste dispositivo na amostra, um pulso elétrico é aplicado ao aquecedor, ao mesmo tempo em que o sensor de temperatura inserido na outra agulha registra a variação de temperatura provocada pelo pulso (HAMDEH, 2001). Quando a temperatura atinge seu valor máximo, é registrado o tempo necessário para se chegar a esta condição, desta forma, usando o tempo máximo e variação máxima de temperatura provocada pelo pulso é que se determina a condutividade térmica. Por este método também é possível se determinar difusividade térmica, capacidade térmica volumétrica independentemente (CAMPBELL *et al.* 1991; BRISTOW *et al.* 1993 e 1994; TARARA e HAM, 1997). Este método pode ser usado em vários tipos de materiais, entretanto, os mesmos precisam ser isotrópicos. Outra limitação, é com relação a líquidos de baixa viscosidade, pois durante o aquecimento provocado pela agulha aquecedora, acontece a formação de correntes convectivas, as quais causam oscilações na leitura de temperatura por parte da agulha aquecedora. (FONTANA *et al.* 1999).
- b. Método de Fitch: Segundo Gelder (1998) este método baseia-se em uma fonte de calor e um dissipador térmico. A fonte de calor é na prática um recipiente que possui suas laterais termicamente isoladas, ao passo que sua parte de baixo, possui alta condutividade térmica. O dissipador térmico é construído em cobre, e suas dimensões garantem que o mesmo possa ser acoplado na parte superior do recipiente fonte de calor, as superfícies de contato do recipiente e do dissipador são devidamente polidas, isto reduz a incidência de resistências térmicas de contato. Durante a análise, a temperatura do recipiente é mantida diferente da temperatura do dissipador, a amostra é posicionada entre estas duas estruturas, devendo ser garantido um perfeito contato físico entre a amostra e as superfícies do recipiente e do dissipador térmico em cobre. Durante o ensaio, termopares monitoram a temperatura do dissipador térmico e da parte inferior do recipiente, é então feita uma relação entre a variação de temperatura do dissipador e o tempo da realização da análise. Aqui as perdas de calor relacionadas com as paredes laterais do recipiente são negligenciáveis. De posse

do perfil de temperatura ao longo do tempo, a condutividade térmica da amostra poderá ser encontrada utilizando a seguinte equação (GELDER, 1998):

$$\ln \frac{(T_0 - T_\psi)}{(T - T_\psi)} = \frac{kA}{Lm_c C_p} t \quad (2)$$

Sendo:

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

k = condutividade térmica da amostra ($W/m \cdot K$)

L = espessura da amostra (m)

m_c = massa do dissipador em cobre (g)

C_p = calor específico do cobre ($J/kg \cdot K$)

t = tempo (s)

T = temperatura do dissipador em cobre (K)

T_0 = temperatura inicial (K)

T_ψ = temperatura da parte inferior do recipiente (K)

- c. Método da sonda quente: este método é uma das técnicas mais tradicionais para a medição da condutividade térmica. Os primeiros estudos com o mesmo foram conduzidos pelo professor Van Der Held em 1948 na Universidade de Utrrecht na Holanda (GELDER, 1998). A metodologia baseia-se no aumento de temperatura da amostra estudada, proporcionada por um fio aquecedor, situado a uma certa distância em relação a um sensor de temperatura. Se o fio aquecedor possui uma dissipação constante de calor ao longo de todo o seu comprimento, a condutividade térmica pode ser encontrada diretamente através das mudanças de temperatura na sonda, ao longo de um intervalo de tempo conhecido (DAVIS, 1984). Segundo Tadini *et al.* (2005) o método pode ser usado para a determinação da condutividade térmica de vários materiais, tais como: metais, plásticos e alimentos. Por ser muito utilizada na determinação da condutividade térmica de alimentos, a metodologia da sonda quente foi escolhida como base do presente trabalho, e por isso, é apresentada com maiores detalhes. A figura 01 mostra o esquema desta metodologia.

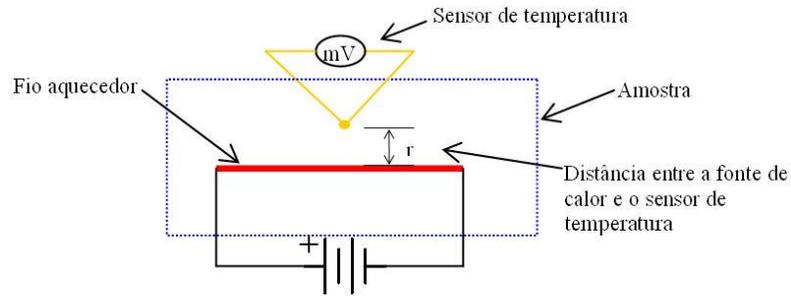


Figura 1-Esquema da metodologia da Sonda Quente

Segundo Carciofi *et al.* (2005) o método da sonda quente pode ser equacionado pela Lei da Conservação da Energia em coordenadas cilíndricas, para a difusividade térmica independentemente da posição e da temperatura.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

Sendo:

T = temperatura ($^{\circ}C$)

t = tempo (s)

r = distância em relação ao fio aquecedor (m)

α = difusividade térmica (m^2/s)

São definidas as condições iniciais e de contorno para a integração da equação (3)

Condição inicial a :

$$t = 0 \longrightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (a)$$

Condições de contorno:

$$r = 0 \quad (t > 0) \longrightarrow -2\pi k \frac{dT}{dr} = q = cte \quad (b)$$

$$r = \infty \quad (t \neq \infty) \longrightarrow \frac{dT}{dt} = 0 \quad (c)$$

A solução é dada por:

$$T = \frac{q}{4\pi k} \left[-Ei \left(-\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \right] \quad (4)$$

sendo:

q = potência de aquecimento do fio aquecedor em W/m e

Ei a integral de Euler, dada por:

$$-Ei(-u) = \int_u^{\infty} \frac{1}{u} e^{-u} du = -C - \ln(u) + \frac{u}{1.(1!)} - \frac{u^2}{2.(2!)} + \dots \quad (5)$$

Em que: C é a constante de Euler, aproximada por 0,5772216.

Se $u = \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right)$ for pequeno, pode-se escrever a função $-Ei(-u)$ em termos de $[-C - \ln(u)]$.

Dessa forma a temperatura de superfície do fio aquecedor pode ser explicada pela seguinte equação:

$$T = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \frac{4\alpha t}{r_0^2} - C \right] \quad (6)$$

Ao invés de se tomar a temperatura em um dado instante, pode-se utilizar a diferença de temperatura entre dois instantes distintos (t_1 e t_2). A equação (6) poderá ser reescrita como:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{q}{4\pi k} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (7)$$

Essa equação define o fenômeno nas seguintes condições idealizadas:

- Fio de comprimento infinito;
- Raio do fio aquecedor infinitamente pequeno;
- Meio circundante (amostra) infinito;
- Inexistência de resistências de contato entre o fio aquecedor e o meio circundante.

Segundo Tadini *et al.* (2005) para realizar a análise da condutividade térmica em alimentos pelo o método da sonda quente, utiliza-se os seguintes materiais e ou equipamentos:

1-Fio aquecedor: normalmente é de níquel cromo, tem a função de realizar o aquecimento necessário para a realização da análise;

2-fonte de corrente contínua: tem a função fornecer corrente e voltagem constante para o fio aquecedor;

3-Sensor eletrônico temperatura: geralmente é um termopar, o qual é responsável pela determinação dos valores de temperatura durante o tempo da análise;

4-Módulo de aquisição de dados: tem a função realizar a interface entre o sensor eletrônico de temperatura e um microcomputador;

5-Microcomputador com software adequado: equipamento que controla todos os demais itens durante a análise, além de realizar todo o processamento matemático necessário para se determinar a condutividade térmica do material estudado.

Ainda segundo Tadini *et al.* (2005) a determinação da condutividade térmica de uma amostra, pelo método da sonda quente, segue os seguintes passos:

1-Inicialmente, a amostra deverá ter sua temperatura estabilizada, pois caso a temperatura esteja variando durante o período da análise, os resultados obtidos não serão corretos. Outro cuidado importante é com relação ao tamanho da amostra, a mesma deve ser grande o suficiente para evitar que ocorram trocas térmicas entre a sonda e o meio externo. Em seus trabalhos, Rahman, (1995) recomenda que o diâmetro mínimo de amostras líquidas, como a glicerina por exemplo, não seja menor que 2,8 cm.

2-Depois de garantir que as condições acima ocorram, a sonda poderá ser inserida na amostra para a realização do ensaio. A sonda deverá permanecer imóvel, pois a sua movimentação durante o período da análise, também poderá gerar erros de medição. A sustentação da sonda poderá ser conseguida com o auxílio de um suporte.

3-Dadas todas as condições para análise, a mesma se inicia no momento em que começa o aquecimento do fio de níquel cromo, seguido da coleta de dados referentes à temperatura nas proximidades do mesmo. Ao final de um tempo predeterminado, todo o sistema de aquecimento e de coleta de dados de temperatura é finalizado. Neste momento, o ensaio está terminado e a sonda poderá ser removida do meio.

4-De posse dos dados referentes à evolução da temperatura em função do tempo, constrói-se um gráfico (Figura 2). No mesmo são escolhidos os intervalos de tempo t_1 e t_2 , compreendidos entre um trecho linear, feito isso, é determinada a variação de temperatura entre

os instantes t_1 e t_2 , desta forma, e utilizando-se a equação (7), é determinada a condutividade térmica do meio.

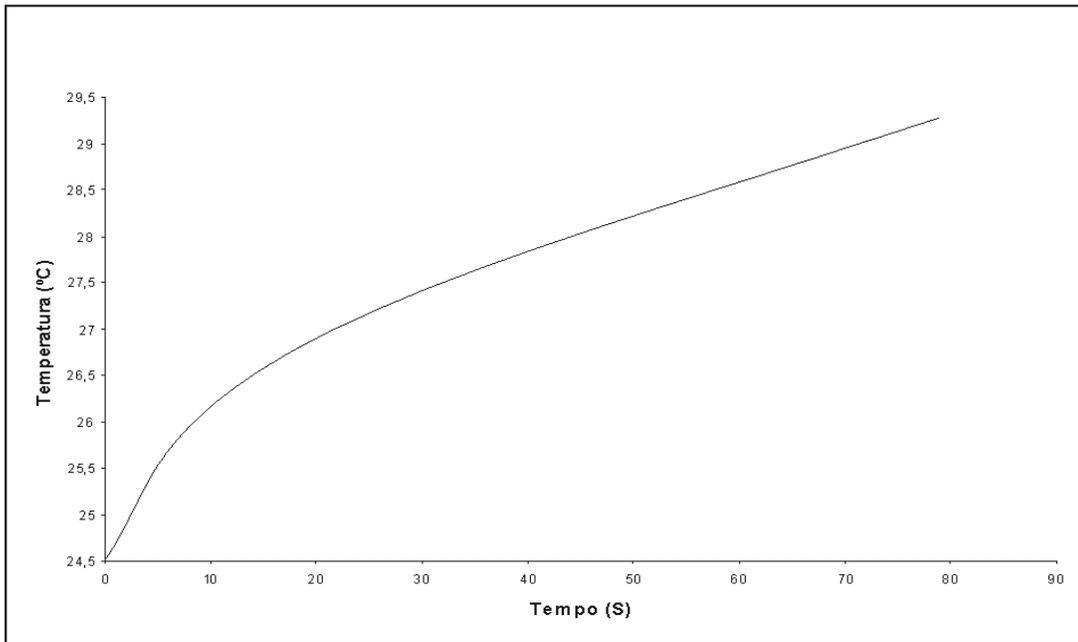


Figura 2-Gráfico relacionando tempo e temperatura durante análise da condutividade térmica pelo método da sonda quente

Utilizando a metodologia da sonda quente foram realizados vários trabalhos para a medição da condutividade térmica de alimentos, dentro os quais pode-se citar: Rahman (1991) que determinou as condutividades térmicas da carne do camarão rei (0,485 W/m °C), e da carne de lula (0,122 W/m °C); Alagusundaram *et al.* (1991) que determinaram as condutividades térmicas da lentilha (0,249 W/m °C) e da cevada (0,232 W/m °C); Sreenarayanan e Chattopadhyay (1986), que determinaram a condutividade térmica do arroz branco (0,158 W/m °C); Delgado *et al.* (1996) que encontrou o valor de 0,55 W/m °C para morangos frescos e 0,93 W/m °C para morangos congelados à -15 °C.

Atualmente, existe um aparelho fabricado comercialmente capaz de determinar a condutividade térmica de materiais líquidos e pastosos, o qual utiliza a teoria da sonda quente como princípio de funcionamento. Este equipamento é o KDII, fabricado pela Decagon Devices, o mesmo é compacto e portátil e realiza análises em aproximadamente 2 minutos. O aparelho consiste de uma sonda (agulha) com 60 mm de comprimento por 1,2 mm de diâmetro (DECAGON DEVICES, 2006). A figura 3 mostra o KDII.



Figura 3-O KDII

Fonseca (2007) realizou a caracterização termofísica de nanofluidos, as condutividades térmicas dos mesmos, foram determinadas por um KDII.

Medeiros *et al.* (2007) determinaram as propriedades físico-químicas do leite de cabra *in-natura* e seco em spay dryer. Utilizando um KDII, determinaram também a condutividade térmica destes alimentos. Os valores encontrados foram de 0,46 W/m°C para o leite *in-natura* e 0,56 W/m°C para o leite desidratado.

Fontana *et al.* (1999) utilizando um KDII e um Thermo Link, equipamento este que utiliza a técnica do pulso de calor com agulhas duplas, determinaram as condutividades térmicas da maçã, variedade *red delicious*, e da carne bovina. Os resultados analíticos obtidos pelos dois aparelhos se mostraram muito semelhantes.

2.2. Microcontroladores

Segundo Susnea *et al.* (2005) microcontrolador é um circuito integrado que integra no mesmo chip um microprocessador, uma certa quantidade de memória e um número de interfaces periféricas.

Souza (2003) define um microcontrolador como um componente eletrônico dotado de “inteligência” programável, ou seja, esse componente possui uma memória interna que possibilita a gravação de uma seqüência de instruções estruturadas na forma de programa, que serão executadas seqüencialmente ou respondendo a eventos internos ou externos.

Os microcontroladores estão presentes nos mais diversos produtos, um automóvel, por exemplo, utiliza mais de 15 microcontroladores. Uma casa moderna pode conter mais de 50 desses circuitos, eles estão presentes em aparelhos de microondas, aparelhos de som, DVD e TV, máquinas de lavar roupas, brinquedos eletrônicos etc (SICKLE, 2001).

De acordo com Kuhnel *et al.* (2000) a arquitetura básica de um microcontrolador é a seguinte:

1 - Unidades de Memória

1.1 RAM (Memória de acesso aleatório): É um tipo de memória que mantém os dados memorizados enquanto for mantida a alimentação. O termo acesso aleatório identifica a capacidade de acesso a qualquer posição da memória em qualquer momento, por oposição ao acesso seqüencial imposto por dispositivos como os discos rígidos por exemplo, isso facilita o acesso às informações armazenadas, dessa forma, a memória RAM será normalmente utilizada em um sistema microcontrolado para memorizar o dado de trabalho gerado dinamicamente pelo programa em execução (variáveis, etc.).

1.2 ROM (Memória para somente leitura): memória que permite apenas a leitura, ou seja, as suas informações são gravadas pelo fabricante uma única vez e após isso não podem ser alteradas ou apagadas, somente acessadas

1.3 EEPROM - (Memória somente de leitura programável e apagável eletricamente): Esta memória pode ser apagada e gravada. Ela pode ser usada para armazenar informações de configuração, dados de identificação, programas etc. A mesma não é volátil, ou seja, as informações armazenadas não serão apagadas se a alimentação do circuito for removida.

2-Unidade Central de Processamento (CPU): Este componente é quem comanda e executa todas operações de processamento do microcontrolador.

3-Pinos de Entrada/Saída: Pinos de ligação externa do microcontrolador, que podem ser configurados como entrada ou saída. Na maioria dos casos, os pinos de entrada e saída permitem ao microcontrolador comunicar, controlar ou ler informação. Nestes pinos, podem ser conectados visores de cristal líquido, conversores analógicos/digitais, circuitos dedicados para leitura de temperatura ou outras grandezas, circuitos de controle de máquinas dentre outros.

A Figura 4 mostra um microcontrolador básico, este modelo é o PIC16C56 fabricado pela Microchip. Este microcontrolador possui 18 pinos, sendo que 12 são pinos de entrada e saída. Os demais são para alimentação, ligação com oscilador, reset etc. (MICROCHIP, 2002)

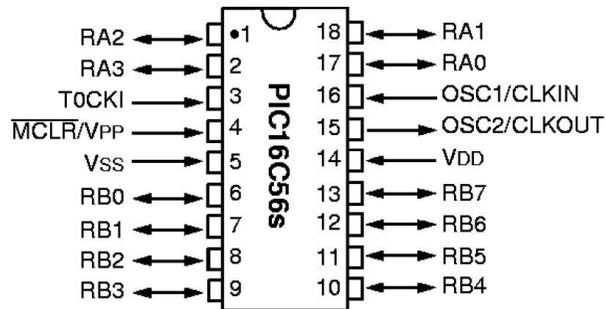


Figura 4-Microcontrolador PIC PIC16C56

Como em um microcomputador *Desktop*, o microcontrolador necessita ser programado para funcionar, ou seja, é necessário criar um código, em uma linguagem compatível, e gravá-lo na memória do microcontrolador, normalmente esta operação é realizada com o auxílio de circuito especial chamado gravador, o qual é conectado a um computador, este por sua vez, possui um programa que permite que o usuário possa escrever os códigos que serão gravados no microcontrolador. Depois que o microcontrolador é programado, ele poderá ser removido do gravador e instalado no circuito de interesse. Atualmente, a operação de gravação do microcontrolador pode acontecer no próprio circuito de interesse (PARALLAX INC, 2000).

Rajendran e Neelamegam (2003) desenvolveram um instrumento, baseado em um microcontrolador, capaz de realizar leituras da condutividade elétrica em líquidos. O aparelho utiliza um microcontrolador AT89C55WD e uma ponte de *Wheatstone* modificada.

Chun e Jun (2000) construíram um controlador simplificado de processos para a indústria de alimentos, baseando-se em um microcontrolador modelo TMS73C85. O dispositivo desenvolvido, realizava leituras de temperatura, umidade e intensidade luminosa, além controlar o chaveamento de 6 relês. O equipamento foi testado em uma planta piloto, onde o mesmo foi conectado a um sistema climatização para o controle das condições ambientais: umidade, temperatura e intensidade luminosa.

Gonzaga *et al.* (2006) desenvolveram um manômetro de leitura digital microprocessado de baixo custo. Foram utilizados um microcontrolador *Basic Step*, um sensor de pressão MPX5700DP e conversor analógico digital de 8 bits de resolução. O manômetro construído pode substituir, sem prejuízos, modelos de custo elevado e de difícil manutenção.

Acosta e Carrero (2003) construíram um sistema de automação baseado em um microcontrolador PIC16F877, para controlar um secador destinado a secar massas alimentícias. O sistema controla automaticamente o tempo e a temperatura de secagem do produto, reduzindo os custos do processo e melhorando a qualidade do produto final.

Gaião *et al.* (2005) construiu um fotômetro portátil e de baixo custo, utilizando um microcontrolador PIC16F877. O instrumento usa seis *LEDS* como emissores de radiação e um

fototransistor como detector da radiação. O equipamento tem total autonomia de funcionamento, ou seja, não é necessário conectá-lo a nenhum outro tipo de equipamento para realizar as análises.

2.2.1. O Microcontrolador BASIC STAMP

O microcontrolador Basic Stamp II é fabricado pela Parallax Inc., empresa situada nos Estados Unidos. O Basic Stamp II possui grandes vantagens em relação a outros microcontroladores. A que mais chamou atenção para este projeto foi a utilização da linguagem de programação PBASIC, ou seja, uma linguagem de alto nível, muito semelhante ao Basic, a qual facilitou o desenvolvimento dos códigos necessários. Outra vantagem assegurada pela Parallax na utilização do Basic Stamp é a sua compatibilidade com outros dispositivos necessários ao projeto, como por exemplo: visores de cristal líquido, co-processadores matemáticos dentre outros (PARALLAX INC, 2000).

Segundo a Parallax Inc., o seu fabricante, o Basic Stamp II não é somente um microcontrolador, na verdade ele é um dispositivo modular, ou seja, na mesma placa de circuito, existe um microcontrolador PIC16C57, especialmente programado com um interpretador de comandos em linguagem *PBASIC*; um chip de memória EEPROM e um circuito regulador de tensão. O módulo ainda possui um oscilador de 20 MHz e um capacitor. A Figura 5 mostra um módulo Basic Stamp II.

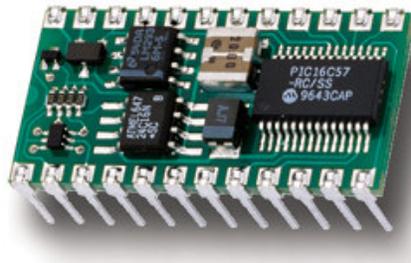


Figura 5-Módulo Basic Stamp II

O módulo Basic Stamp II vem de fábrica com somente o interpretador de comandos para o PBASIC, toda a programação adicional (usuário), é realizada com o auxílio de um microcomputador PC e do software Stamp Editor.

A interface do módulo ao microcomputador é feita via comunicação serial. Para tal, existe hardware específico (Figura 6).

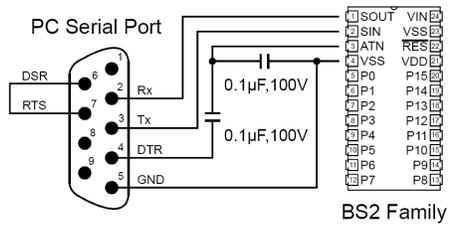


Figura 6 -Esquema de ligação serial entre o PC e o Basic Stamp
 Fonte: PARALLAX INC, 1994

A tabela 01 mostra as principais características do módulo Basic Stamp.

Tabela 1- Características do Basic Stamp

Velocidade do processador	20 MHz
Velocidade de execução dos programas	Aprox. 4.000 instruções por segundo
Memória RAM	32 bytes
Memória EEPROM	2 kbytes
Pinos I/O	16
Voltagem de trabalho	5 a 15 Volts (CC)
Corrente de trabalho	3 mA + 25 mA para cada pino I/O em uso

Fonte: PARALLAX INC, 1994

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do equipamento, utilizou-se o microcontrolador Basic Stamp II. Os demais itens do aparelho serão devidamente explicados ao longo do texto.

3.1 Sistemas dedicados do aparelho

3.1.1. Leitura de temperatura

Esta é a parte mais delicada de todo o sistema, pois a determinação da condutividade térmica do material desejado está diretamente relacionada ao seu perfil de temperatura ao longo do tempo (DAVIS, 1984). A variável que realmente é medida no método da sonda quente é a temperatura, sendo assim, é necessário estabelecer uma forma de leitura de temperatura que seja de alta resolução e de precisão, além de ser compatível com o Basic Stamp.

Inicialmente, realizaram-se testes com o módulo de termopar DS2760, fabricado pela própria Parallax (Figura 7). Este dispositivo pode ser facilmente conectado ao Basic Stamp, sendo necessário apenas a ligação de um dos pinos (I/O) do microcontrolador (PARALLAX INC, 2004).

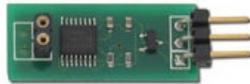


Figura 7-Módulo para termopar DS2760

O DS2760 permite a conexão direta de três tipos de termopar: K, J e T, bastando para isso, carregar na memória do Basic Stamp o programa específico para cada tipo. Apesar da aparente facilidade na utilização do DS2760, o mesmo se mostrou inadequado ao projeto, pois apresentava dois inconvenientes:

- Baixa resolução na medida da temperatura: como dito anteriormente, para a realização da análise da condutividade térmica é necessário que o sensor de temperatura possua uma alta resolução. Com o DS2760, conseguiu-se uma resolução de leitura de apenas 0,3 °C.
- Comprometimento da memória do Basic Stamp: para que o Basic Stamp funcione com o DS2760, é necessário carregar em sua memória o software específico, este possui tamanho considerável, comprometendo assim grande parte da memória EEPROM do Basic Stamp, desta maneira não sobraria espaço na memória para os demais sistemas necessários ao projeto, como exemplo, os códigos necessários para controlar o

aquecimento na sonda, visor de cristal líquido e todo o equacionamento necessário para se determinar a condutividade térmica.

Devido a estas dificuldades, constatou-se que seria impossível desenvolver o projeto utilizando o módulo de termopar DS2760.

Após uma nova pesquisa no mercado, adquiriu-se outro sistema de leitura de temperatura baseada em termopar, o circuito integrado MAX6674 (Figura 8), fabricado pela Dallas-Maxim. Segundo seu fabricante (DALLAS-MAXIM, 2002), este circuito necessita de um código muito pequeno para o seu funcionamento com o Basic Stamp, dessa forma, não se teve os problemas relacionados a espaço na memória do Basic Stamp. Entretanto, este componente também apresentou problemas em sua utilização, problemas estes relacionados à instabilidade na leitura, ou seja, durante a realização dos testes em amostras com sua temperatura controlada e estável, ocorria uma flutuação excessiva nos valores de temperatura lidos pelo termopar. Revisou-se todo o circuito e não se encontrou uma maneira de corrigir o problema, desta forma, descartou-se a idéia da utilização do MAX6674 no projeto.



Figura 8-Circuito integrado MAX 6674

Devido aos problemas apresentados, decidiu-se trocar o sensor de temperatura baseado em termopar por um baseado em um termistor. Escolheu-se para tal o termistor B57540G0103J fabricado pela EPCOS. Segundo o manual do fabricante (EPCOS, 2006) este modelo de termistor apresenta grande estabilidade, precisão (0,01 °C) e respostas rápidas nas leituras. Este componente também foi escolhido devido às suas diminutas dimensões, pois o mesmo deveria ser inserido em uma agulha hipodérmica com menos um milímetro de diâmetro interno (HAM e BENSON, 2004). As Figuras 9a e 9b dão uma idéia das dimensões, em milímetros do termistor escolhido para o projeto.

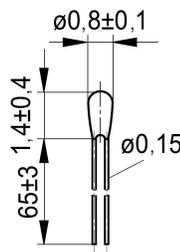


Figura 9a-Dimensões em milímetros do termistor B57540G0103J



Figura 9b-Tamanho do termistor B57540G0103J

Para a leitura do termistor, escolheu-se um método descrito no manual Earth Measurements da Parallax (PARALLAX INC, 1999). Realizou-se uma adaptação no método descrito, que descreve originalmente, uma maneira de se medir a condutância elétrica de líquidos.

A Figura 10 mostra o esquema para a leitura da condutância elétrica proposto pelo manual. O método está baseado na utilização do circuito integrado NE555 (Figura 11) e do comando “COUNT” no Basic Stamp.

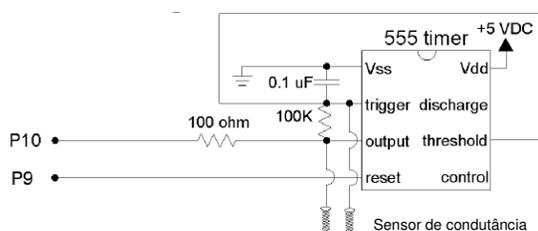


Figura 10-Circuito para a leitura da condutância elétrica
Fonte: PARALLAX INC, 1999



Figura 11-Circuito integrado NE555

O princípio de funcionamento é tal que o NE555 fica configurado para trabalhar no modo astável, ou seja, como um oscilador, gerando uma frequência ininterrupta e constante que pode ser lida pelo *Basic Stamp* através do pino (I/O) de número 10.

O pino 9 do Basic Stamp se mantém sempre no estado “Alto”, ou seja, mantém uma tensão de 5 volts no pino 04 do NE555, isto garante que o circuito integrado seja sempre “resetado” antes do início de cada leitura.

O pino 10 do Basic Stamp é quem recebe o sinal da oscilação produzida pelo NE555, verifica-se aqui a presença de um resistor de 100 Ω , este evita que ocorra a queima do pino (I/O) caso aconteça algum problema de sobrecarga.

A presença de um resistor de 10 k Ω ligado aos pinos 02 e 03 do NE555 e um capacitor de 0,1 μ F ligado nos pinos 01 e 02 do circuito integrado, se faz necessária para estabelecer a frequência de oscilação do NE555, ou seja, se forem alterados os seus valores, a frequência de oscilação do circuito também será modificada. Seguindo esta lógica, percebe-se que existe uma estrutura ligada em paralelo com o resistor de 100 Ω , esta estrutura é na verdade um par de fios de cobre com parafusos de aço inoxidável em cada extremidade. Se estas duas pontas de prova forem introduzidas na água, por exemplo, acontecerá alterações na resistência equivalente entre os pinos 02 e 03 do NE555, dessa maneira, a frequência de oscilação do circuito integrado mudará. Portanto, pode-se relacionar a condutância elétrica do meio em questão com a variação da frequência de oscilação do NE555.

No manual Earth Measurements (PARALLAX INC, 1999), pode-se encontrar toda descrição acima, além das equações que relacionam frequência de oscilação e condutância elétrica.

Na Figura 12 é mostrado o circuito modificado, neste trabalho, para leitura do termistor. O resistor de 100 k Ω e as pontas de prova foram removidos do circuito, em suas posições, inseriu-se o termistor, o qual estabelecerá a frequência de oscilação do NE555 devido a sua resistência variável com a temperatura.

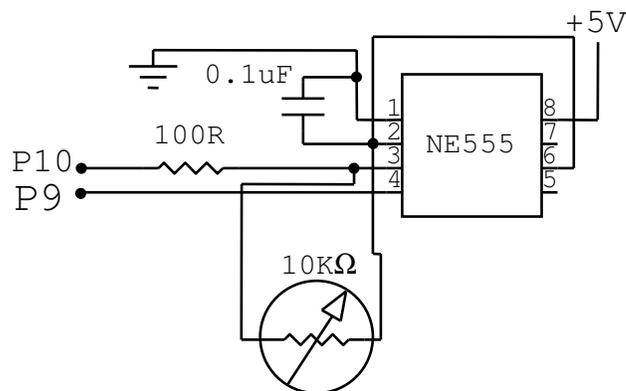


Figura 12-Circuito modificado para leitura do termistor

O próximo passo foi relacionar matematicamente a variação da frequência de oscilação do circuito com a temperatura, de forma a se conseguir uma equação adequada para medir esta última, usando o circuito proposto. Toda a operação necessária para a calibração do termistor será devidamente explicada ao longo do texto.

Na Figura 13 é mostrado o circuito necessário para a leitura do termistor, juntamente com a conexão serial para um microcomputador PC.

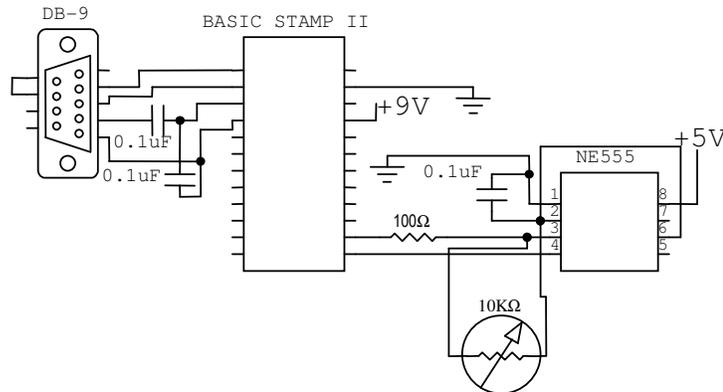


Figura 13-Circuito completo para leitura do termistor e comunicação com o PC

Após terem sido feitas as devidas conexões entre o PC e o circuito, desenvolveu-se o software responsável pela leitura da frequência de oscilação do NE555, utilizando o Stamp Editor, o editor de códigos para o *Basic Stamp* na linguagem *PBASIC*. O apêndice A, mostra um exemplo de código para a leitura da frequência de oscilação do NE555.

Com o circuito já em funcionamento e devidamente conectado ao microcomputador PC, realizou-se “*download*” do programa para o *Basic Stamp*. Então, iniciou-se o procedimento para a obtenção dos valores da frequência de oscilação do NE555 em relação à temperatura:

1. Inicialmente, ligou-se o banho termostático e programou-se o mesmo para que a solução do seu reservatório chegasse a 0 °C. O valor de 0 °C é a menor temperatura que poderá ser lida pelo sistema. O banho termostático utilizado foi o TC 502, fabricado pela *Brookfield* ;
2. Após a estabilização da temperatura em 0 °C, inseriu-se o termistor no banho termostático. Rapidamente, a frequência de oscilação do NE555 chegou ao valor de 4475 Hz, este número foi mostrado em uma janela especial do Stamp Editor conhecida como *DEBUG TERMINAL*;
3. Ajustou-se a temperatura do banho para 2 °C. Após a estabilização da mesma, inseriu-se o termistor novamente na solução do banho. Obteve-se o valor 4830 Hz.

Repetiu-se este procedimento, elevando-se a temperatura sempre em 2 °C até atingir-se a temperatura de 46 °C, a mesma ficou definida como o valor de temperatura mais alto que o aparelho será capaz de detectar.

Utilizou-se o software *TableCurve* 2D versão 5.01, desenvolvido pela *Systat Software Inc.* para determinar uma equação que se ajustasse a curva de calibração do termistor.

A equação obtida (ver resultados e discussão), e a suas constantes, são incompatíveis com o Basic Stamp, pois o mesmo só consegue manipular números inteiros que estejam compreendidos entre 0 e 65535. (PARALLAX INC.,1994) A solução para este problema foi a introdução de um co-processador aritmético no circuito.

Escolheu-se o co-processador aritmético *Pak II*, fabricado pela AWC inc. (Figura 14) que é relativamente barato e possibilita a manipulação de números compreendidos entre os valores $-6,80564693 \times 10^{38}$ a $6,80564693 \times 10^{38}$. Trabalhando em conjunto com o *Basic Stamp*, o *Pak-II* realiza a maioria das operações matemáticas e com grande confiabilidade (AL WILLIAMS COMPANY, 2004)



Figura 14-Co-processador aritmético Pak-II

Na Figura 15 é mostrado o circuito já com a introdução do *Pak - II*

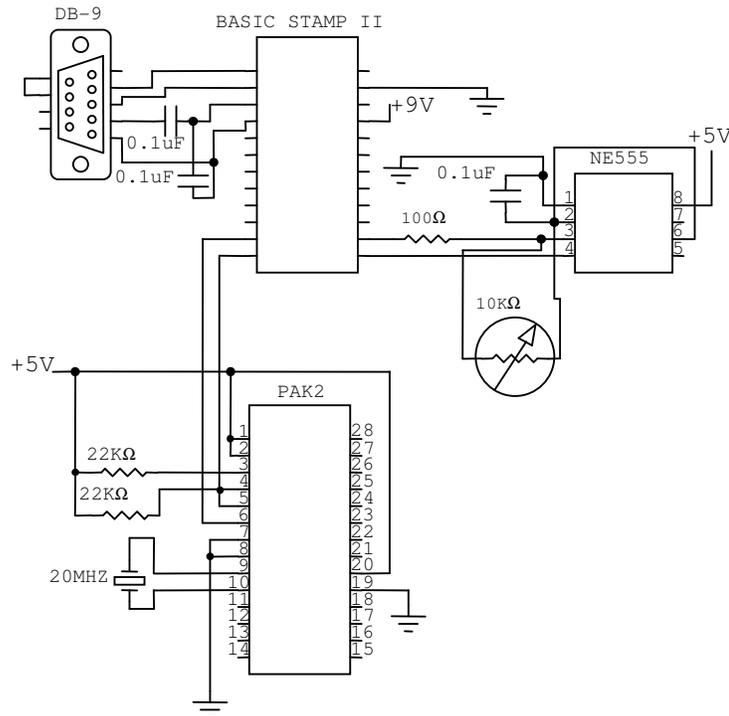


Figura 15-Circuito com o co-processador aritmético *Pak-II*

Todos os códigos necessários para a realização das mais diversas operações matemáticas utilizando o *Basic Stamp II* e o *Pak II* encontram-se disponíveis no CD ROM que acompanha o dispositivo, utilizando estes códigos, conseguiu-se realizar a leitura da temperatura.

3.1.2. Aquecimento da agulha:

Para realizar o aquecimento da agulha, utilizou-se um fio de níquel cromo inserido no interior da agulha, este fio é percorrido por uma corrente elétrica gerada por um circuito adicional controlado pelo Basic Stamp, dessa maneira, conseguiu-se o aquecimento da sonda.

O circuito construído (Figura 16), funciona da seguinte maneira: assim que se inicia um procedimento de análise, o *Basic Stamp* através de um de seus pinos (I/O), envia uma pequena corrente elétrica (25 mA) para a base do transistor TIP41, e faz com que o mesmo envie uma corrente de ganho maior para o relê ligado em seu pino emissor, dessa forma, o relê fecha o circuito entre o regulador de tensão LM7806 e o fio de níquel cromo, gerando assim, o aquecimento do fio. Quando a análise é finalizada, o Basic Stamp interrompe o fornecimento de corrente no pino (I/O) correspondente, desarmando assim o relê, já que o TIP41 não mais fornecerá corrente para a bobina do mesmo. Com isso, cessa-se o aquecimento do fio de níquel cromo.

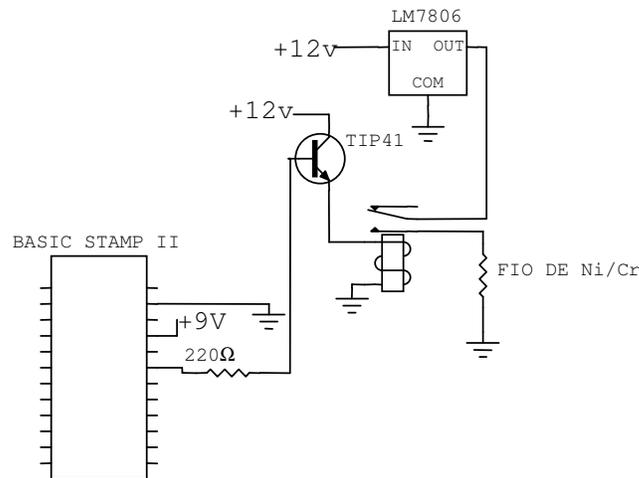


Figura 16-Circuito responsável pelo aquecimento da sonda

Segundo Davis (1984) o calor dissipado pela sonda precisa ser constante e uniforme ao longo de todo o seu comprimento, dessa maneira, o circuito envolvido nesta operação, bem como o fio aquecedor, devem ser escolhidos cuidadosamente. Utilizou-se um fio de níquel cromo especial, fabricado pela *Pelican Wire Company*. Segundo o fabricante, o mesmo é confeccionado com uma liga composta por de 80% de níquel e 20% de cromo de alta pureza, isso reduz bastante a variação da corrente em função do aquecimento. Outra vantagem deste fio,

é que o mesmo possui isolamento externo, composto por uma resina especial conhecida por *Polyimide*, e que tem a capacidade de resistir à temperaturas de até 240 °C por um período de 10 minutos seguidos. Esse isolamento externo permitiu inserir o fio na agulha sem que ocorressem curtos circuitos.

Para o fornecimento da tensão necessária ao aquecimento, utilizou-se o regulador de tensão LM7806 alimentado com 12 volts. Segundo Braga, (2001) este regulador é capaz de fornecer 6 volts com baixo *ripple*, desde que sua tensão de alimentação seja no mínimo 3 volts maior que aquela que ele pretende regular, no caso 6 volts.

Pode-se determinar a potência de aquecimento no fio aquecedor, pela definição de potência elétrica dissipada, utilizando a seguinte equação:

$$P = I^2 \cdot R \quad (8)$$

sendo:

P = potência dissipada por metro (W/m)

I = corrente elétrica (A)

R = resistência por metro do fio aquecedor (R/m)

Segundo Ham *et al.* (2004) pode-se determinar a corrente no circuito aquecedor mediante a utilização de um resistor *Shunt*. Estes autores utilizaram o resistor de precisão SM155-4, fabricado pela *Precision Resistor Company* com 1Ω de resistência e 0,01% de tolerância.

Braga (2001) descreve os passos necessários para se determinar a corrente de circuitos utilizando-se resistores *shunts*.

Utilizou-se, portanto, um SM155-4 e um multímetro, para determinar a corrente elétrica que percorre o circuito da agulha aquecedora.

De posse dos valores da corrente elétrica (0,0643 A) e da resistência total do fio de níquel cromo, que é de $890,8\Omega$ por metro, determinou-se por meio da equação 9 a potência dissipada por metro na agulha aquecedora (3,68 W/m).

3.2.1. Sonda completa

Utilizou-se, para construir este dispositivo, uma agulha hipodérmica de 1,50 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento, estas dimensões estão de acordo com o que foi proposto por Rahman, (1995) o qual afirma que uma sonda linear de aquecimento, com fluxo de calor axial desprezível, pode ser aproximada pela seguinte relação:

$$L/D \geq 25 \quad (9)$$

Sendo:

L = comprimento da agulha (m)

D = Diâmetro da agulha (m)

A agulha escolhida para o projeto possui 100 milímetros de comprimento por 1,5 milímetros de diâmetro externo, dessa forma, a relação comprimento/diâmetro é igual a 66,66, portanto, maior do que 25.

3.2.2. Circuito completo

Montou-se todo o circuito do aparelho em uma placa de circuito impresso fabricada em fenolite. A Figura 17 mostra o esquema do circuito, nela verifica-se a presença de um *piezo speaker*, visor de cristal líquido e três interruptores, todos estes itens serão revistos nos Resultados e Discussão do presente trabalho.

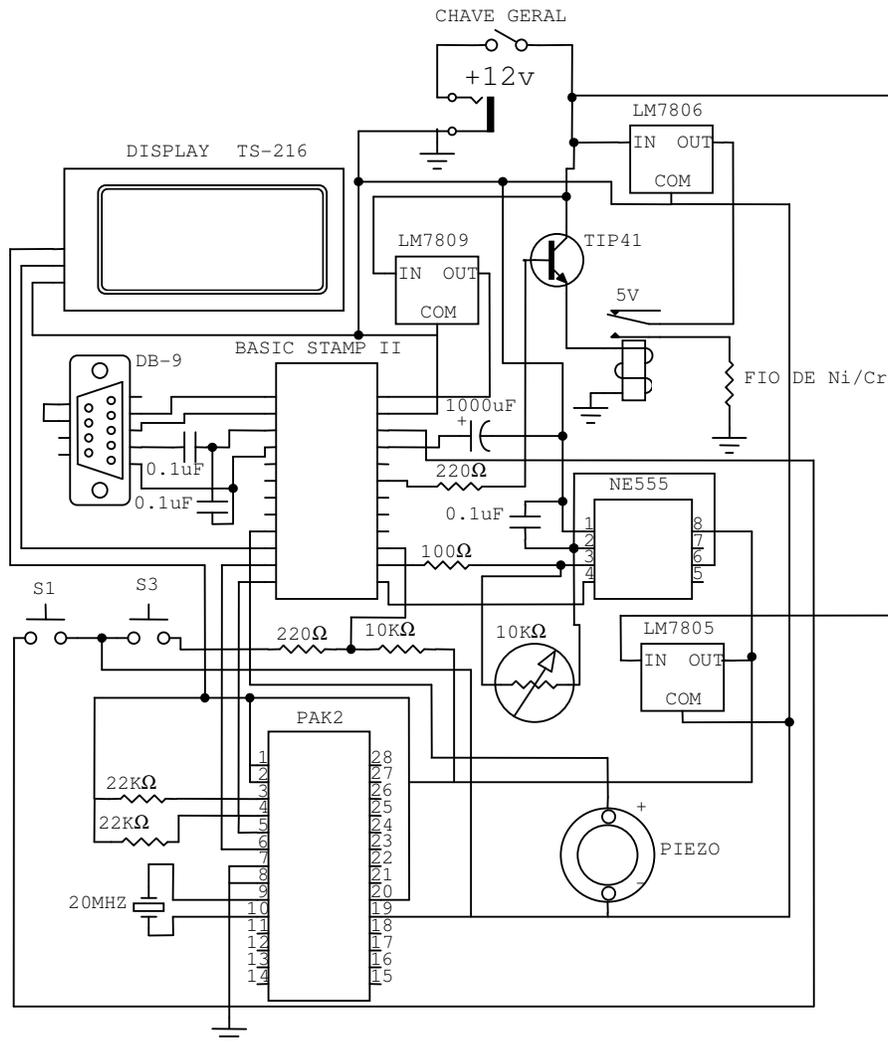


Figura 17-Circuito completo

3.2.3. Determinação do intervalo de medição

De forma semelhante aos trabalhos de Tadini *et al.* (2005) escolheu-se a glicerina P.A. como material para a realização da calibração do aparelho, ou seja, para a determinação do intervalo de medição t_1 e t_2 .

Como valor padrão da condutividade térmica da glicerina, tomou-se o citado por Kreith *et al.* (2003) que é de 0,286 W/m.°C à 25 °C. Dessa forma, calibrou-se o aparelho baseado neste valor.

A calibração foi feita da seguinte forma:

Usou-se um béquer de 200 ml com a glicerina PA. Colocou-se o béquer, contendo a glicerina, no banho termostático regulado à temperatura de 25 °C.

Com a temperatura da glicerina em 25 °C (mediu-se esta temperatura com um sensor eletrônico), inseriu-se a sonda de leitura do aparelho e iniciou-se a operação de coleta de dados, ou seja, o instrumento iniciou o aquecimento da sonda ao mesmo tempo em que os dados referentes à variação da temperatura eram enviados para um computador PC.

A operação de calibração do sensor está baseada simplesmente na determinação dos tempos t_2 e t_1 da Equação (7) e de suas respectivas temperaturas.

É necessário encontrar, através da análise do gráfico tempo versus temperatura, quais serão os valores do tempo que deverão ser inseridos na Equação (7).

Depois da determinação dos valores dos tempos, estes não são mais alterados, desta forma, a variável na Equação (7) será exclusivamente a diferença de temperatura correspondente aos instantes t_2 e t_1 .

Os dados de temperatura ao longo do tempo foram registrados em uma planilha do Microsoft Excell onde se construiu o gráfico de calibração.

Os dados também foram analisados no software Microcal Origin (v. 6.0) da seguinte forma:

- ✓ Escolheu-se um trecho na curva tempo versus temperatura que aparentasse linearidade;
- ✓ Ajustou-se equações de regressão linear para este trecho da curva, determinando-se os valores do coeficiente de correlação e do valor do χ^2 (qui-quadrado);
- ✓ Diminui-se o intervalo de tempo em 2 segundos acima do menor valor e 2 segundos abaixo do maior valor e recalculou-se os valores do coeficiente de correlação e do valor do qui-quadrado, repetindo-se o processo até que não houvesse variação na terceira casa decimal, sendo estabelecido, então, este trecho para utilização nas leituras do aparelho.

O Apêndice B mostra os dados referentes às regressões lineares realizadas, que ilustram o procedimento descrito acima.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Montagem final da sonda

A Figura 18 mostra detalhes construtivos da sonda, no interior da agulha, foram inseridos o fio de níquel cromo, juntamente com o termistor. Para a fixação destes itens no interior da agulha, utilizou-se resina epox (comercial – Marca Araldite), pois este tipo de adesivo possui grande condutividade térmica e baixa condutividade elétrica. Todo o conjunto da sonda foi montado em uma base de teflon, o mesmo garante a sustentação mecânica da agulha e dos cabos, além de proteger as ligações elétricas.

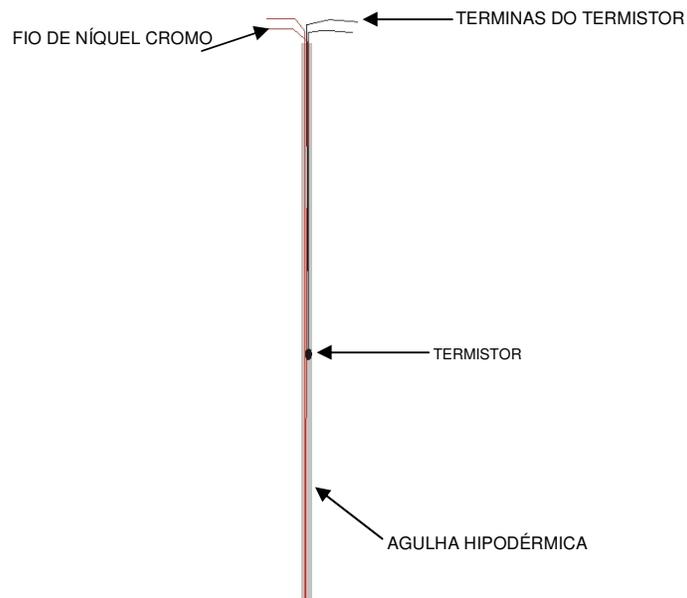


Figura 18-Esquema do interior da sonda

A Figura 19 mostra a aparência final da sonda. A Figura 20 mostra uma vista explodida da mesma, nessa figura, observa-se a presença da base e da tampa fabricadas em teflon, parafusos para sua fixação, além dos cabos elétricos para a ligação do fio de níquel cromo e do termistor com o circuito eletrônico do aparelho. Os detalhes relacionados às dimensões da sonda são mostrados na Figura 21.

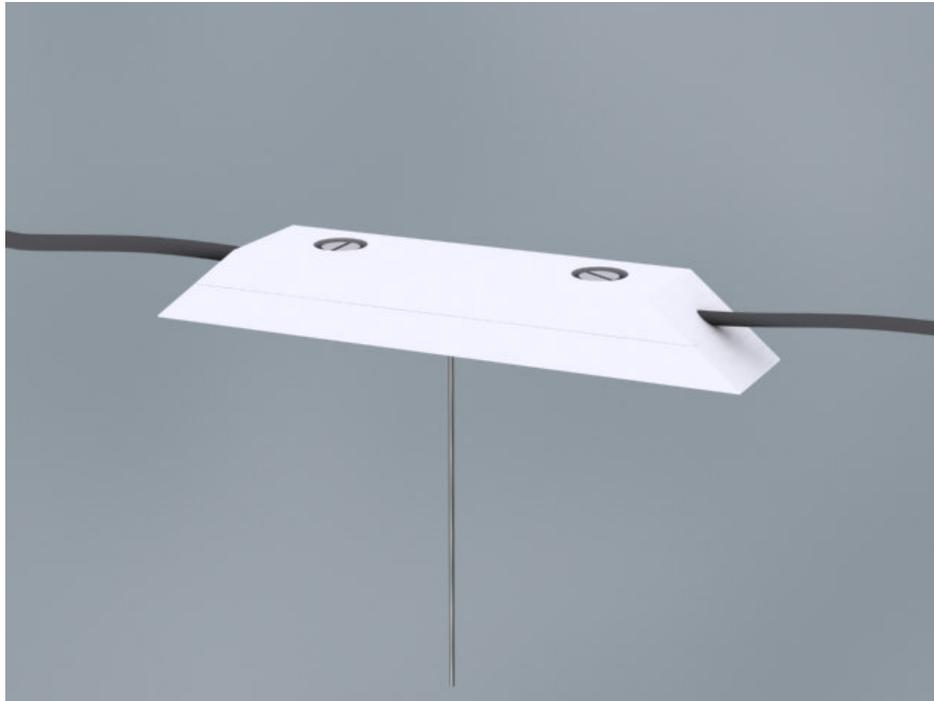


Figura 19–Sonda completa

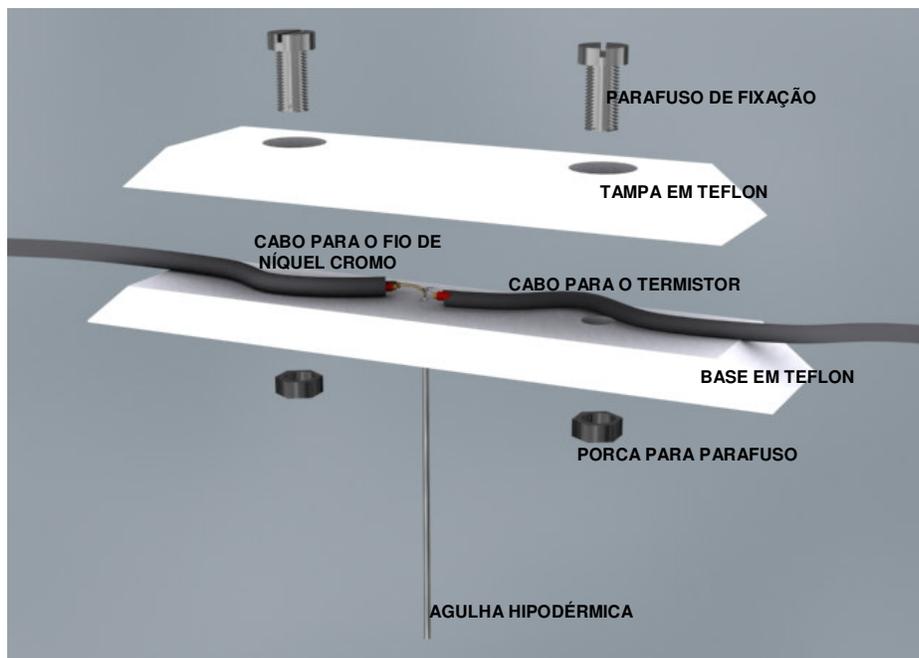


Figura 20-Vista explodida da sonda

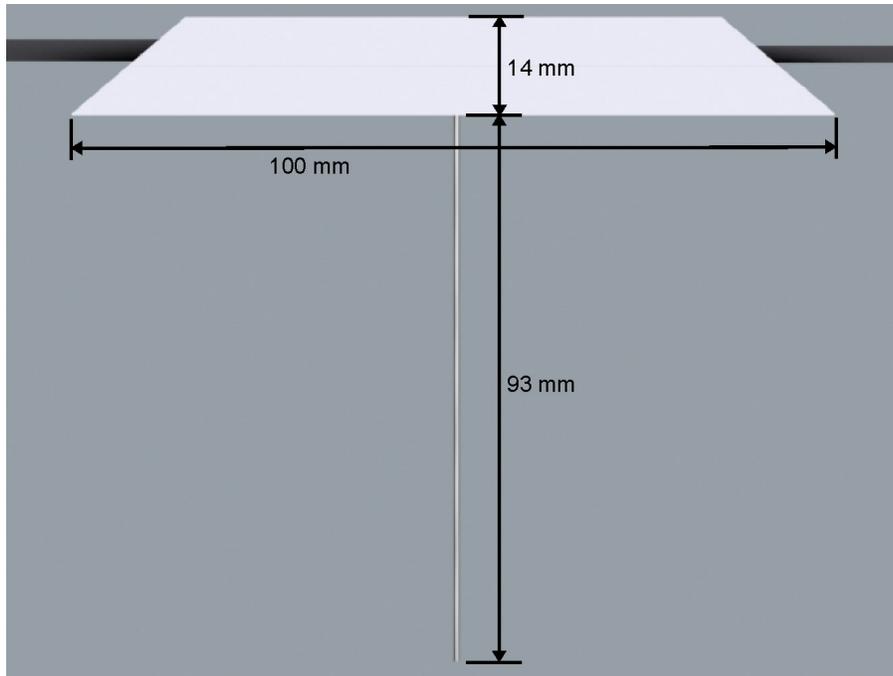


Figura 21-Dimensões da sonda

No projeto em questão, foi desenvolvida uma sonda com um desenho diferente dos propostos pela literatura. Foi proposta uma estrutura que buscasse facilitar a realização da análise em amostras líquidas ou que necessitem de um recipiente para contê-las durante a análise. A Figura 22 mostra como exemplo, a sonda projetada inserida em uma amostra líquida, contida em um recipiente. Observar que não há a necessidade de nenhum tipo de suporte para a sonda. Em outros tipos de desenhos de sonda, se faz necessário o uso destes dispositivos. A Figura 23 ilustra esta afirmação.

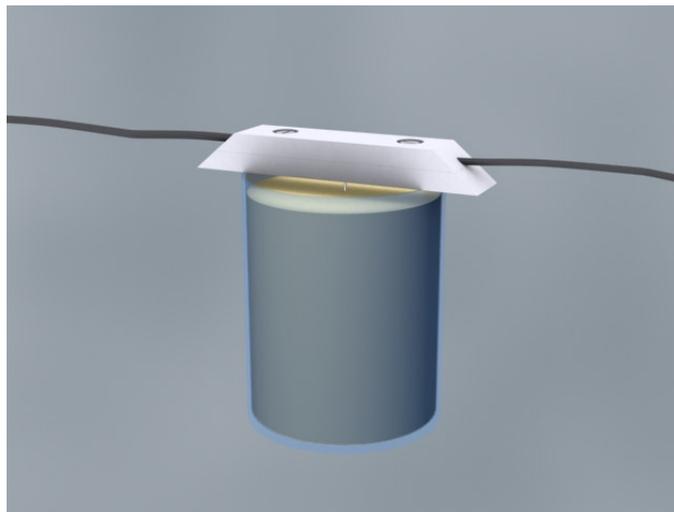


Figura 22-Exemplo de utilização da sonda

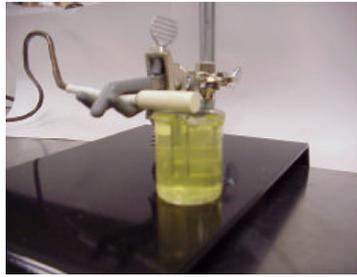


Figura 23-sonda de prova sustentada por suporte para realização da análise em amostra líquida

4.2. Unidade de saída do aparelho

Inicialmente, durante a etapa de construção do aparelho, foi utilizado como unidade de saída, o *DEBUG TERMINAL*, ou seja, uma janela do *Stamp Editor* mostrada na tela do PC. Entretanto, como o objetivo do projeto, era projetar um aparelho portátil e independente de computador para seu uso, era necessário definir uma outra maneira para externar os resultados obtidos, dessa forma, escolheu-se um visor serial de cristal líquido para realizar esta função. Adquiriu-se o modelo TS-216 fabricado pela Tato Equipamentos Eletrônicos, o qual se mostrou muito fácil de se utilizar com o *Basic Stamp*, pois todas as respectivas ligações e códigos necessários ao seu funcionamento estavam descritos em seu manual. A Figura 24 mostra uma foto do TS-216.



Figura 24-Display Serial TS-216

Também foi instalado no circuito do aparelho, um *piezo speaker*, responsável pela emissão de pequenos sinais sonoros (*bips*), os quais facilitam a operação do aparelho (Figura 25).



Figura 25-Piezo speaker

4.3. Botões de controle

Foram instalados no aparelho, dois interruptores de pressão (Figura 26), um é responsável pela reinicialização do dispositivo, e o outro é destinado aos demais comandos necessários para a realização da análise de condutividade térmica. Inseriu-se também uma chave geral no circuito, a mesma é responsável por ligar ou desligar o equipamento.



Figura 26 - Interruptor de pressão

4.4. Aparelho pronto

A montagem final do equipamento foi feita em uma pequena caixa confeccionada em aço, a mesma possui 13 cm de comprimento, 7,5 cm de largura e 4,5 cm de altura. A figura 27 mostra a aparência final do aparelho.

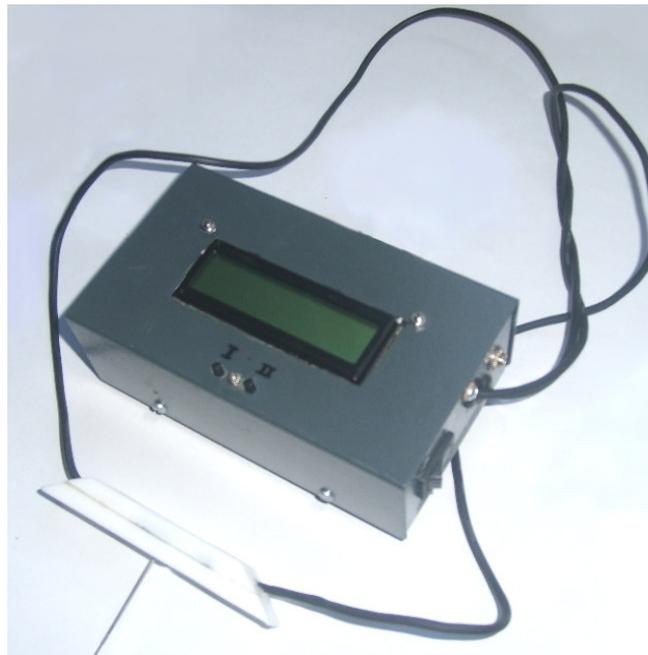


Figura 27-Foto do aparelho completo

4.5. Operação do aparelho

A operação do aparelho é muito simplificada, pois a análise é feita de forma automática, bastando o operador seguir algumas instruções indicadas no próprio *display* do aparelho. Abaixo, está descrito o procedimento para a realização de análises utilizando o aparelho construído.

1. Preparação da amostra: a amostra, caso seja líquida ou pastosa, deverá ser depositada em um recipiente que tenha pelo menos 2,5cm de diâmetro e 9,3 cm de profundidade, esta profundidade poderá ser maior, o que deve ser levado em consideração é que a sonda fique completamente submersa na amostra, pois caso isso não aconteça, os resultados obtidos não serão confiáveis.
2. A análise deverá ser realizada com a amostra em uma temperatura estabilizada, caso contrário, o aparelho não realizará a análise, pois o mesmo dispõe de um algoritmo que detecta variações de temperatura da ordem de aproximadamente 0,02 °C. Quando acontece este tipo de problema, o aparelho emite dois bips, e no seu display é mostrada uma mensagem de erro (Figuras 28a e 28b)

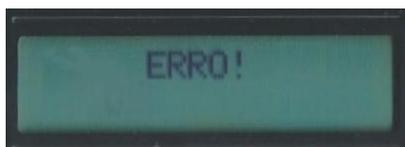


Figura 28a – Mensagem de erro



Figura 28b – Mensagem de erro

3. Dadas as condições para a realização da análise, deve-se então conectar a fonte de alimentação do aparelho em uma tomada 220V, em seguida, deverá ser conectado, na lateral do aparelho, o *plug* de alimentação oriundo da fonte de energia.
4. Após conectado o plug de energia, o aparelho poderá ser ligado através de um interruptor, localizado na parte lateral do aparelho. Assim que é ligado o aparelho mostra em seu display a seguinte mensagem: “Insira sensor aperte tecla 1 ” (Figura 29). A tecla 1 está devidamente identificada no painel principal do aparelho.



Figura 29 – “Insira sensor aperte tecla 1 ”

5. Seguindo a instrução dada acima, o operador deverá introduzir a sonda na amostra e a seguir pressionar a tecla 1, após esta ação, o aparelho exibe a mensagem “Estabilizando, aguarde...”(Figura 30). É durante esse período (90 segundos) que a temperatura da agulha (sonda) entra em equilíbrio com a da amostra, caso a temperatura não se equilibre, o aparelho emitirá a mensagem descrita no item 2. Quando o aparelho emitir esta mensagem de erro, o operador poderá reiniciar o sistema e tentar realizar novamente a análise, bastando para isso apertar o botão 2, situado ao lado do botão 1 no painel principal. Assim que é pressionado o botão 2, o aparelho reinicia todo procedimento de análise.



Figura 30 – “Estabilizando, aguarde...”

6. Caso não aconteçam variações da temperatura durante a operação de estabilização de temperatura, o aparelho entrará no modo de análise, ou seja, começará efetivamente realizara a análise. Nesta fase, aparece a seguinte mensagem em seu display “Analisando, aguarde” (Figura 31).

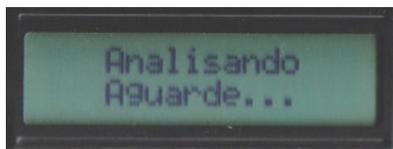


Figura 31 – “Analisando, aguarde”

7. Depois de transcorrido cerca de 1 minuto e meio, o aparelho mostrará em seu mostrador o resultado da análise. Como exemplo, é visto o resultado para glicerina, analisada em uma temperatura de 28,0 °C (Figura 32).



Figura 32 – Resultado de análise

8. De posse do resultado, a sonda poderá ser removida da amostra e o aparelho poderá ser desligado. Deve-se, entretanto, realizar a limpeza da agulha, utilizando para tal, um pano umedecido com água.

4.6. Calibração do Termistor

A Figura 33 mostra a relação entre temperatura e a frequência de oscilação gerada pelo NE555 durante o procedimento de calibração do termistor.

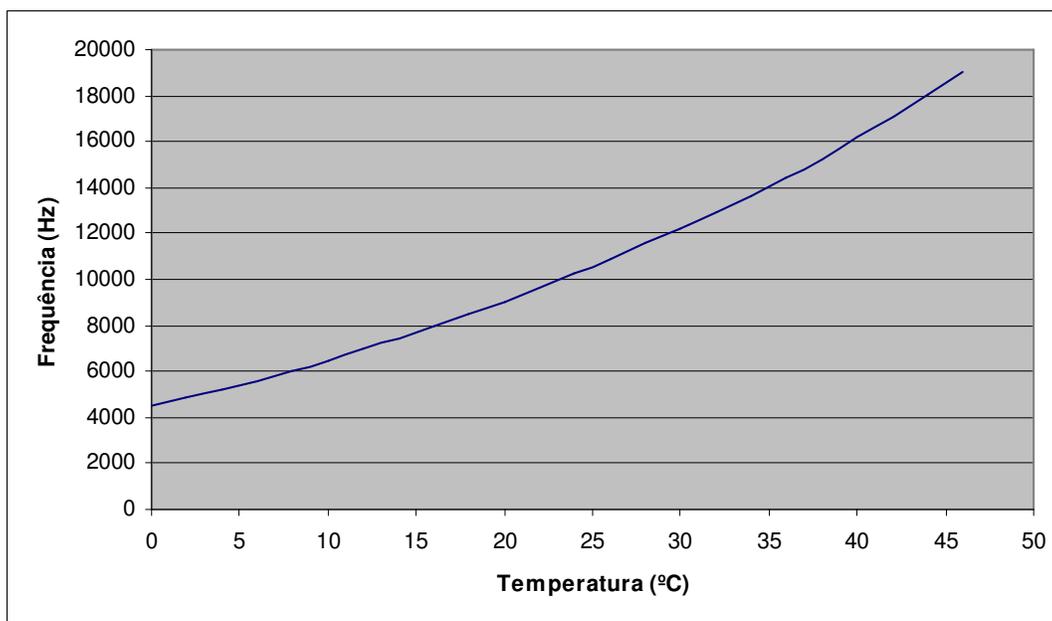


Figura 33-Gráfico comparativo entre frequência de oscilação e temperatura

A equação de calibração obtida foi a seguinte:

$$y = -1039,394 + 74,487 \ln(x) + 3457,602/\ln(x) \quad (10)$$

Sendo:

y = temperatura (°C);

x = valor da frequência de oscilação (Hz) medida.

4.7. O intervalo de medição

A Figura 34 mostra a curva característica final, para leitura das temperaturas no processo de medição, o intervalo obtido foi entre 49 e 61 segundos, com coeficiente de correlação de 0,9995.

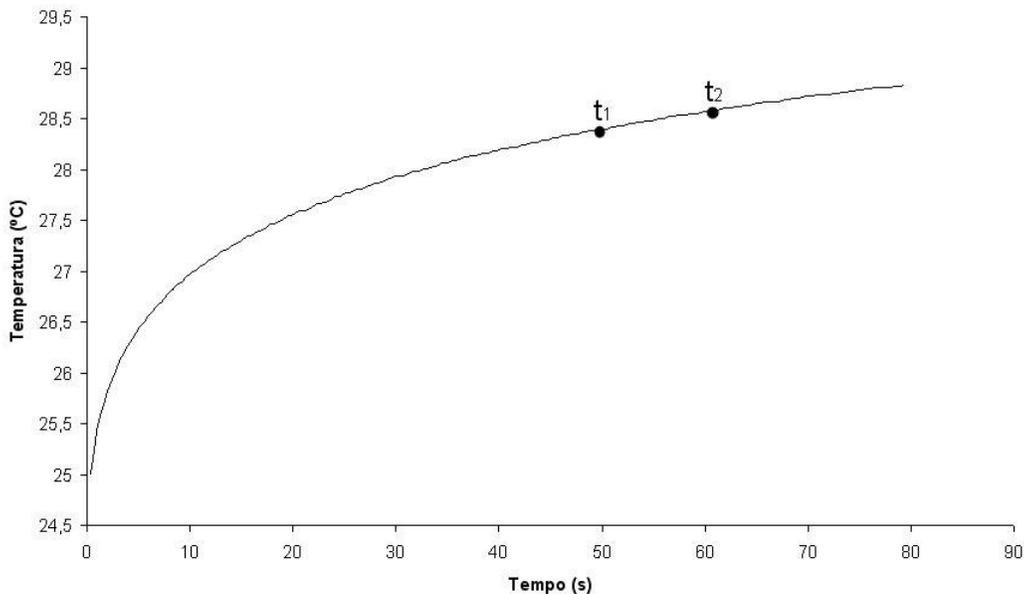


Figura 34—Curva demonstrando os intervalos assumidos para calibração.

4.8. Calibração da sonda com o KDII

Para a calibração do protótipo com o KDII, utilizou-se um banho termostático, regulado nas temperaturas de 10, 15, 20, 25 e 30 °C. Béqueres contendo amostras dos produtos a serem analisados foram inseridos no banho, assim que a temperatura das amostras estivessem equilibradas com a temperatura do banho, eram realizadas análises de cada produto, utilizando o KDII e o protótipo. As análises foram realizadas em triplicata para cada produto, cada aparelho e cada temperatura. Os resultados das análises, relacionando as leituras do KDII com a sonda protótipo construída (aqui denominada ALX-I) estão na Tabela 2.

Observou-se que, para a glicerina não houve variação da condutividade térmica com a temperatura e que para os alimentos, a variação foi menor que a faixa de erro do KDII que é de 10% (o maior valor foi de 8,82%, para o leite condensado na temperatura de 15 °C). Os valores para a glicerina, estão em concordância com a literatura (KREITH, 2003).

A condutividade térmica do leite condensado à 40 °C foi determinada por Sweat e Parmelee (1978) o valor encontrado foi de 0,33 W/m °C, observa-se aqui, um valor ligeiramente

diferente dos resultados encontrados nos experimentos do presente trabalho, a explicação para este valor diferente pode estar relacionada à composição do leite condensado, pois o que foi analisado por Sweat e Parmelee (1978) possuía 30% de água em sua composição, já o produto analisado pelo KDII e pelo ALX-1 continha 26% de água em sua composição. O teor de umidade do leite condensado foi determinado utilizando um determinador de umidade da marca *Sartorius* modelo MA30.

Tabela 2-Leituras do KDII e do protótipo para diferentes produtos em diferentes temperaturas (valores médios de leituras em triplicata).

PRODUTO	Temperatura do Banho (°C)	KDII	ALX-I	DESVIO MEDIO (%)
Creme de leite	10	0,41	0,42	1,95
	15	0,44	0,46	4,55
	20	0,40	0,42	5,04
	25	0,41	0,42	2,42
	30	0,42	0,42	0,24
Ketchup	10	0,48	0,51	5,56
	15	0,47	0,48	2,11
	20	0,48	0,51	7,62
	25	0,48	0,49	2,93
	30	0,50	0,51	1,13
Leite condensado	10	0,35	0,35	0,67
	15	0,34	0,37	8,82
	20	0,35	0,37	5,71
	25	0,35	0,36	4,14
	30	0,36	0,35	1,03
Glicerina	10	0,28	0,29	5,54
	15	0,28	0,29	5,00
	20	0,28	0,29	4,82
	25	0,28	0,29	3,39
	30	0,28	0,29	1,29

Observou-se que, para a temperatura de 15 °C, no creme de leite, aconteceu uma subida abrupta no valor da condutividade térmica, tanto nas leituras realizadas pelo KDII quanto nas realizadas pelo ALX-1. Sweat e Parmelee (1978) determinaram a condutividade térmica de creme de leite nas temperaturas de 0 e 20 °C e os valores encontrados foram de 0,33 W/m °C e 0,36 W/m °C, respectivamente, ou seja, com a diferença de temperatura de 20 °C, a variação da condutividade térmica foi de apenas 0,03 W/m °C, estes valor é proporcionalmente muito menor do que os valores encontrados entre 10 e 15 °C do presente trabalho, que foram entre 0,03 e 0,04 W/m °C para uma variação de temperatura de apenas 5 °C. Desta maneira, não foi encontrado na literatura explicação para o aumento de condutividade térmica observado à 15°C. Uma explicação possível para esta anomalia, seria um aumento na vibração gerada pelo banho termostático, uma vez que o mesmo possui sistemas de refrigeração e agitação (bomba)

automáticos, ou seja, estes dois sistemas entram em funcionamento ou são desativados automaticamente, não tendo sido esta vibração, notada pelo observador durante a tomada dos dados.

Também em relação ao creme de leite, é importante mencionar que a faixa de valores encontrada neste trabalho está acima da encontrada por Sweat e Parmelee (1978), esta faixa superior pode estar relacionada à diferença no teor de gordura dos cremes de leite, que no trabalho daqueles autores, estava em torno de 40%. O produto utilizado para as análises desta dissertação possuía apenas 25% de gordura. (teor declarado no rótulo do produto).

Não foram encontrados na literatura, valores para a condutividade térmica do ketchup.

Para todos os alimentos utilizados e, em todas as temperaturas, os valores obtidos com o protótipo estiveram dentro da faixa de precisão do KDII, sendo o menor desvio obtido de 0,24% para o creme de leite a 30 °C e o maior de 8,82%, para o leite condensado a 15 °C.

A Tabela 3 mostra os resultados da análise de regressão para os valores obtidos com os dois aparelhos.

Tabela 3-Resultados da análise de regressão para os valores obtidos com os dois aparelhos.

TERMO	Coefficiente	Interv. de Conf. a 95% de prob		Erro padrão	Estatística t	GL	p
Interseção	0,0292	-0,0023	a 0,0607	0,01178	2,48	52	0,0165
Inclinação	0,8687	0,7927	a 0,9446	0,02841	30,58	52	<0.0001
Análise de variância da Regressão							Parâmetros do Ajuste
Causa de variação	SQ	GL	QM	Estatística F		p	
Modelo	0,323	1	0,323	935,19		<0.0001	R ² 0,95
Resíduo	0,018	52	0,000				R ² ajustado 0,95
Total	0,341	53					Erro padrão 0,019

Podem-se, pelos resultados da análise de regressão, relacionar os valores obtidos pelo protótipo com os obtidos com o KDII por:

$$ALX-I = 0,0292 + 0,8687 \times KDII \quad (11)$$

Sendo;

ALX-I: resultados de condutividade térmica obtidos com o protótipo (W/m °C)

KDII: resultados de condutividade térmica obtidos com o KDII (W/m °C)

O coeficiente de determinação relativamente alto obtido (0,95), o erro padrão relativamente baixo (0,019) e a boa concordância entre os valores obtidos com o protótipo e o

KDII (Tabela 1) mostram que os aparelhos se equivalem, na medição da condutividade térmica dos produtos testados.

A Figura 35 mostra o gráfico com a relação entre as medidas, equação de regressão e os intervalos de confiança e previsão obtidos, enquanto a Figura 28 mostra o gráfico de resíduos padronizado.

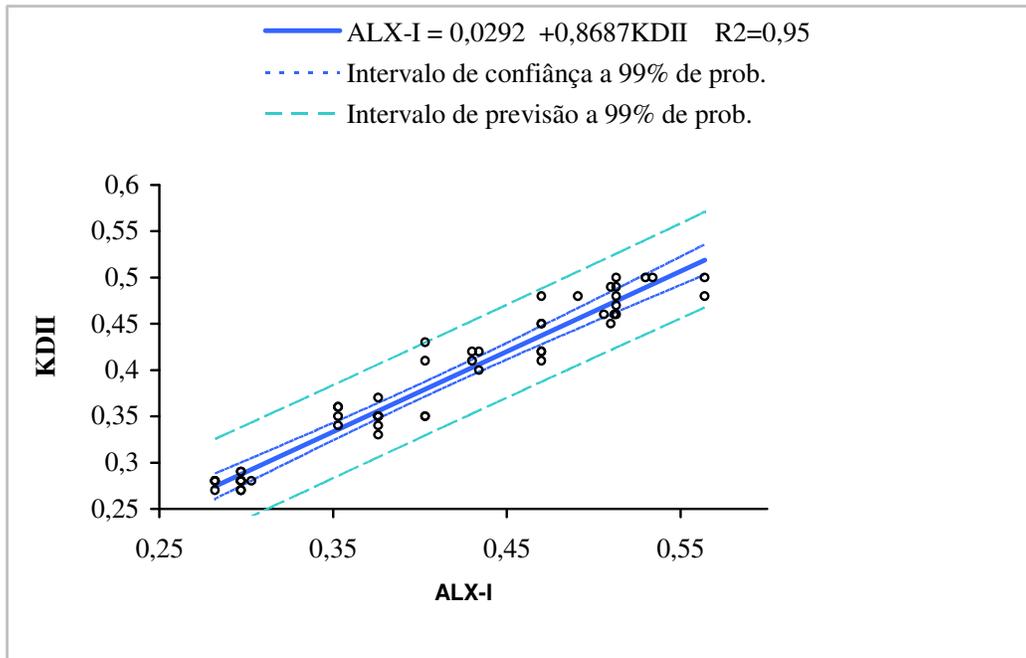


Figura 35-Equação de regressão, intervalo de confiança e de previsão para os valores obtidos com a sonda protótipo e o KDII

Pela análise do intervalo de confiança verificamos que a hipótese do coeficiente linear da reta (interseção) ser zero, não pode ser rejeitada ($p > 0,01$ pelo teste de t) indicando que não existe tendência de erro sistemático por parte da sonda protótipo. Na faixa de valores estudada (0,28 a 0,51 W/m °C) a amplitude do intervalo de confiança é de 0,06. Sendo assim, na pior das hipóteses, ao nível de 1% de probabilidade, o erro cometido ao utilizar a sonda protótipo será de +/- 0,03 W/m °C em 0,28 W/m °C, ou seja, menor do que, ou no máximo igual a 10,7% sendo este valor muito próximo da precisão do KDII que, segundo o fabricante (DECAGON DEVICES, 2006) é de 10%. Confirma-se, assim, a equivalência entre os aparelhos.

O gráfico de resíduos (Figura 36), mostra a normalidade da distribuição de erros, confirmando a qualidade do ajuste.

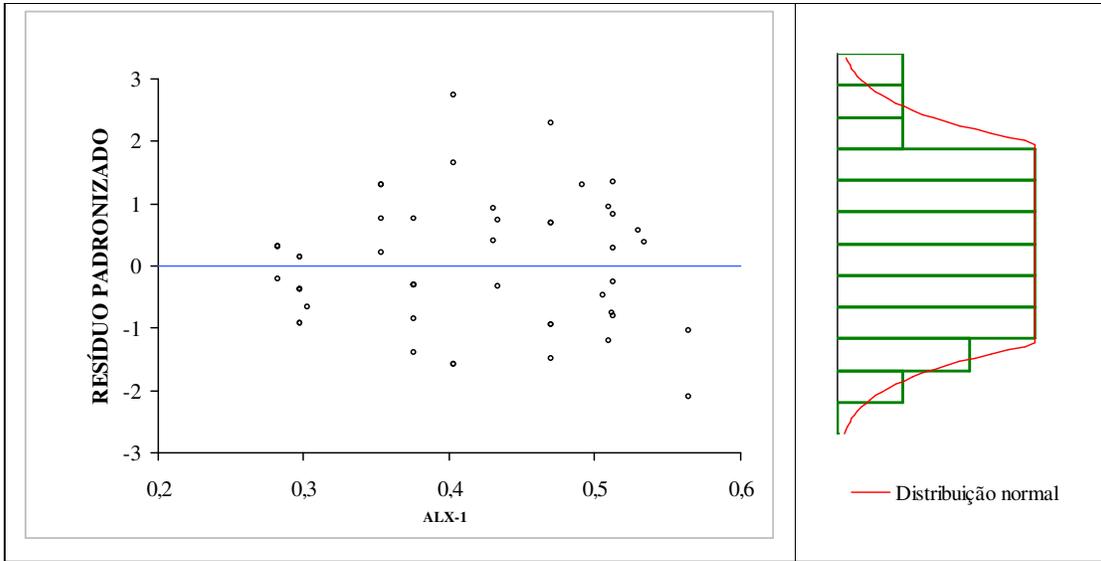


Figura 36-Gráfico de resíduos padronizados entre os valores obtidos com a sonda protótipo e o KDII

5. CONCLUSÕES

O instrumento desenvolvido neste trabalho, não possui similar produzido no Brasil. O mesmo utiliza estrutura interna baseada na tecnologia dos microcontroladores, a qual possibilitou a construção de um aparelho que apresenta grande facilidade na operação, tamanho reduzido, baixo custo, se comparado aos similares fabricados fora do Brasil, além de ser capaz de realizar as análises sem a presença de qualquer dispositivo adicional, como por exemplo, microcomputador, utilizado em ensaios corriqueiros para a determinação da condutividade térmica.

Comparando-se o instrumento protótipo com o KDII, equipamento fabricado fora do país e de funcionamento similar ao protótipo desenvolvido verificou-se que, ao nível de 1% de probabilidade, o erro máximo cometido na utilização do instrumento desenvolvido será de 10,7%, portanto, bastante próximo à precisão do KDII que é de 10%. Isto permitiu concluir que o aparelho desenvolvido equivale ao KDII para a faixa de valores de condutividade térmica estudados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em uma etapa futura do desenvolvimento do instrumento protótipo, poderão ser estudadas faixas mais amplas de leitura da condutividade térmica, que no presente trabalho se limitaram a valores compreendidos entre 0,28 a 0,51 W/m °C; a utilização do aparelho também poderá ser avaliada em alimentos sólidos ou mesmo na forma de pó; poderão ser efetuadas melhorias no *design*, bem como a redução do tamanho dispositivo; a fonte de alimentação poderá ser substituída por um sistema de baterias, tornando o aparelho mais adequado para análises de campo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

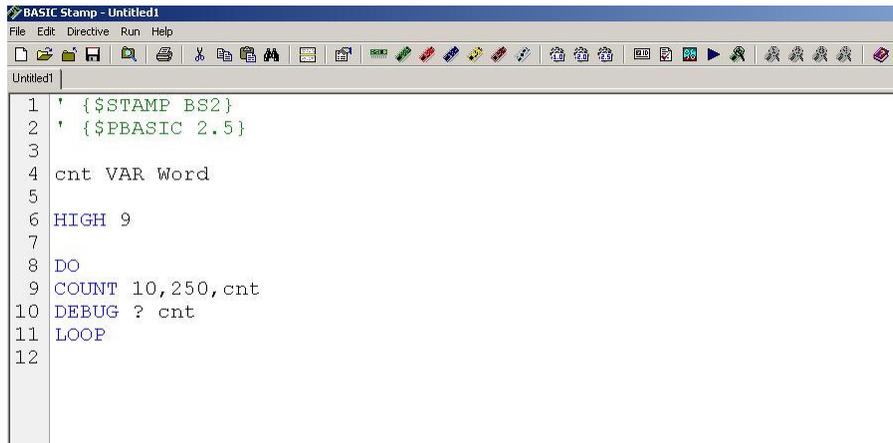
- ACOSTA, G. A.; CARRERO, N. S. C. Diseño del sistema de control del proceso de secado de pastas alimenticias. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. n. 2, p. 80-85, fev. 2003.
- ALAGUSUNDARAM, K, Jayas, D.S. Thermal conductivity of bulk barley, lentils, and peas. *Transactions of the ASAE* n. 34, p.1784-1788. 1991
- AL WILLIAMS COMPANY. Pak-II Datasheet. League City. 2004. 24 p.
- BRAGA, N. C. Curso Básico de Eletrônica. 4 ed. São Paulo: Saber, 2001. 272 p.
- BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S.; CALLISSNDORFF, C. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, n. 55, p. 291-293, 1993.
- BRISTOW, K.L.; KLUITENBERG, G.J.; HORTON, H. Measurement of soil thermal properties with dual-probe heat-pulse technique. *Soil Science Society of America Journal*, n. 58, p.1288-1294, 1994.
- CARCIOFI, B.; LAURINDO, J. B.; SOUZA, J. A. R.; MENEZES, M. Medição da condutividade térmica de alimentos (método da sonda quente). Disponível em: www.enq.ufsc.br/labs/profi/projetos.htm. Acesso em: 05/06/2007.
- CAMPBELL, G.S.; CALLISSENDROFF, C.; WILLIAMS, J.H. Probe for measuring soil specific heat using a heat pulse method. *Soil Science Society of America Journal*, n. 55, p. 291-293, 1991.
- CHUN, J. K.; JUN, J.Y. Design of Simplified Food Process Controller based on One Chip Microcontroller. *Food Engineering Progress*, v. 4, n. 1. p. 14-18, 2000.
- DALLAS-MAXIM. Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple to Digital Converter. Sunnyvale. 2002. 8 p.
- DAVIS, W. R. Hot-wire method for the measurement of the thermal conductivity of refractory materials. New York: Plenum Press. 1984. 161 p.
- DECAGON DEVICES. KDII Thermal properties analyzer, User's Manual. Pullman. 2006. 56 p.
- DELGADO, A. E.; Gallo, A.; PIANTE D.; RUBIOLO E. Thermal Conductivity of Unfrozen and Frozen Strawberry, *Journal of Food Engineering*, n.31, p. 120-123, 1997.
- EPCOS. NTC Thermistors for Temperature Measurement. Munich. 2006. 60 p.
- FONSECA, Henrique Massard da. Caracterização termofísica de nanofluidos. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2007.
- FONTANA, A. J., VARITH, J., IKEDIALA, J., REYES, J. , WACKER, B. Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor. *ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting*, 1999, Toronto Canada. Paper n. 996063.
- GAIÃO, E. da N.; MEDEIROS, E. P.; LYRA, W. da S.; MOREIRA, P. N. T.; VASCONCELOS, P. C. de; SILVA, E. C.; ARAÚJO, M. C. Um fotômetro multi-led microcontrolado, portátil e de baixo custo. *Química Nova*, v. 28, n. 6, p. 1102-1105, ago. 2005.

- GELDER, Maarten van. A Thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures. 1998. 171 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological Systems Engineering) – Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, 1998.
- GONZAGA, L. F.; DIAS, N. da S.; DUENHAS, L. H. Construção e calibração de manômetro de leitura digital microcontrolado. Irriga Botucatu, v. 11, n. 4, p. 492-499, 2006.
- HAM, J. M.; BENSON, E. J. On the construction and calibration of dual-probe heat capacity sensors. Soil Science Society of America Journal. n.68, p.1185-1190, nov. 2004.
- HAMDEH, A.N.H. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. Journal of Agricultural Engineering Research. n. 20, p. 209-216, jan. 2001.
- KREITH, F.; BONH, M. S. Princípios de Transferência de Calor. 2. ed. São Paulo: Pioneira Thomson, 2003. 450 p.
- KUHNEL, C., Zahnert K. Basic Stamp. 2nd ed. New York: Newnes, 2000. 250 p.
- MEDEIROS, U. K. L.; NASCIMENTO, R. J. A.; MARCIANO, L. A.; PASSOS, M. L. A.; MEDEIROS, M. F. D. Análise Comparativa das Propriedades Físicas e Físico-químicas do Leite de Cabra Reconstituído. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 47º, 2007, Natal. Disponível em: www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos/10/10-404-557.htm. Acesso em: 05/01/2008.
- MICROCHIP. PIC16C5 Data Sheet. 2002. 250 p.
- MOHSENIN, N.N. Thermal properties of foods and agricultural materials. New York: Gordon and Breach, 1980. 428 p.
- MOURA, S.C.S.R.; FRANÇA, V.C.L.; LEAL, A.M.C. Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a sucos. Ciência. Tecnologia de alimentos, Campinas, n. 23, p. 62-68 jan. 2003.
- PARALLAX INC. Basic Stamp syntax and reference manual. Rocklin. 1994. 446 p.
- PARALLAX INC. Earth measurements. Rocklin. 1999. 168 p.
- PARALLAX INC. What's a microcontroller. Rocklin. 2000. 124 p.
- PARALLAX INC. Application note for DS2760 module. Rocklin. 2004. 5 p.
- RAJENDRAN, A.; NEELAMEGAM, P. Measurement of conductivity of liquids using AT89C55WD microcontroller. Measurement n. 35. p. 59-63. ago. 2004.
- RAHMAN, S. Food properties handbook. 2nd ed. New York: CRC Press, 1995. 522 p.
- RAHMAN, S. Thermal conductivities of fresh and dried seafood powders. Transactions of the ASAE v.1 n.34. p. 217-220. 1991.
- SICKLE, T. V. Programming microcontrollers in C, 2nd ed. Califórnia: LLH Technology Publishing. 2001. 447 p.

- SIMIONI, Wagner Isidoro. Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do método fluximétrico. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- SOUZA, D. J. de. Desbravando o PIC. 2. ed. São Paulo: Érica. 2003. 250 p.
- SREENARAYANAN, V.V.; CHATTOPADHYAY, P.K. Thermal conductivity and diffusivity of rice bran. *Journal of Agricultural Engineering Research*. n.34 p.115-121. sep. 1986.
- SUSNEA, I.; MITESCU, M. *Microcontrollers in practice*. 3rd ed. Berlin: Springer. 2006. 250 p.
- SWEAT, V. E.; HAUGH, C. G.; STADELMAN, W. J. Thermal conductivity of chicken meat at temperatures between -75 and 20°C. *Food Sci*. n. 33, p. 158-160. jun. 1973
- SWEAT, V.E.; PARMELEE, C.E. Measurement of thermal conductivity of dairy products and margarines. *Journal of Food Process Engineering* n.2, p.187-197. apr. 1978.
- TADINI, C.C.; MATTIO, F.; MATUDA, T. G. Construção de uma sonda linear de aquecimento para determinação da condutividade térmica da massa de pão congelada. *Produção em Iniciação Científica da Escola Politécnica da USP*, v.3, p. 1688-1711, 2006.
- TARARA, J.M.; HAM, J.M. Measuring soil water content in the laboratory and field with dual-probe heat-capacity sensors. *Agronomy Journal*, n.89. p. 535-542, jun. 1997.

APÊNDICE A

A Figura A1, mostra a janela do Stamp Editor juntamente com o código necessário para a leitura da frequência de oscilação do NE555.



```
BASIC Stamp - Untitled1
File Edit Directive Run Help
[Icons]
Untitled1
1 ' {$STAMP BS2}
2 ' {$PBASIC 2.5}
3
4 cnt VAR Word
5
6 HIGH 9
7
8 DO
9 COUNT 10,250,cnt
10 DEBUG ? cnt
11 LOOP
12
```

Figura A1–Janela do Stamp Editor

APÊNDICE B

Análises de regressão linear realizadas no software *Microcal Origin* para a determinação do trecho linear escolhido para a calibração do instrumento.

[25/12/2007 09:51 "/Graph5" (2454459)]
 Linear Regression for C125T0155_T1:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	27,09484	0,03817
B	0,0249	2,72E-04

R	SD	N	P
0,99827	0,01355	31	<0.0001

[25/12/2007 09:51 "/Graph5" (2454459)]
 Linear Regression for C125T0155_T2:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	27,50298	0,03593
B	0,02538	2,56E-04

R	SD	N	P
0,99853	0,01276	31	<0.0001

[25/12/2007 09:51 "/Graph5" (2454459)]
 Linear Regression for C125T0155_T3:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	17,19202	0,02563
B	0,02646	1,83E-04

R	SD	N	P
0,99931	0,0091	31	<0.0001

[25/12/2007 09:51 "/Graph5" (2454459)]
 Linear Regression for C125T0155_T4:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	17,35194	0,02659
B	0,02716	1,90E-04

R	SD	N	P
0,99929	0,00944	31	<0.0001

[25/12/2007 09:52 "/Graph5" (2454459)]
 Linear Regression for C125T0155_T5:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	7,7321	0,0265
B	0,0299	1,89E-04

R	SD	N	P
0,99942	0,00941	31	<0.0001

[25/12/2007 09:52 "/Graph5" (2454459)]
 Linear Regression for C125T0155_T6:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	7,80339	0,02421
B	0,02969	1,73E-04

R	SD	N	P
0,99951	0,00859	31	<0.0001

APÊNDICE C

Códigos desenvolvidos na linguagem PBASIC para o funcionamento do equipamento.

```
'{$STAMP BS2}  
'{$PORT COM1}  
'{$PBASIC 2.5}
```

```
PAUSE 800  
HIGH 0  
cnt VAR Word  
cont VAR Byte  
c VAR Byte  
MAIOR VAR Word  
MENOR VAR Word  
tempo VAR Word  
delta VAR Word  
temp VAR Word  
datap CON 4  
datapin VAR IN4  
clk CON 7  
FSaturate CON $80  
FRound CON $40  
fpstatus VAR Byte  
fpx VAR Word  
fpdigit VAR Byte  
fpxlow VAR Word  
fpxhigh VAR Word  
fpxb0 VAR fpxlow.LOWBYTE  
fpxb1 VAR fpxlow.HIGHBYTE  
fpxb2 VAR fpxhigh.LOWBYTE  
fpxb3 VAR fpxhigh.HIGHBYTE
```

```
SEROUT 12,16780,[254,1]  
SEROUT 12,16780,[254,12]  
SEROUT 12,16780,[20,20,20,20,20,20,"ALX-01"]  
FREQOUT 5,130,2800  
FREQOUT 5,170,3000  
FREQOUT 5,170,2800  
FREQOUT 5,245,3000  
PAUSE 4000
```

```
lcd:  
SEROUT 12,16780,[254,1]  
SEROUT 12,16780,[254,12]  
SEROUT 12,16780,["Insira sensor"]  
SEROUT 12,16780,[254,194,"Aperte tecla 1"]
```

```
DO  
BUTTON 8, 0, 255, 0, cont,1, BIP  
COUNT 1,250, cnt  
LOOP
```

```

BIP:
FREQOUT 5,50,2800
SEROUT 12,16780,[254,1]
SEROUT 12,16780,[254,12]
SEROUT 12,16780,[20,"Estabilizando"]
SEROUT 12,16780,[254,195,"Aguarde..."]
tempo = 0
GOTO STAB:

```

```

STAB:
FOR C=1 TO 160
COUNT 1,250, cnt
tempo = tempo + 1
DEBUG DEC tempo,CRSRX, 15
DELTA = CNT/10
DEBUG DEC DELTA,CR
NEXT

```

```

stab2:
FOR C=1 TO 170
COUNT 1,250, cnt
tempo = tempo + 1
IF (delta + 2) < CNT/10 THEN
GOTO erro
ENDIF
IF (delta - 2) > CNT/10 THEN
GOTO erro
ENDIF
DEBUG ? CNT/10
NEXT
GOTO BIP1

```

```

bip1:
tempo = 0
FREQOUT 5,50,2800
SEROUT 12,16780,[254,1]
SEROUT 12,16780,[20,20,20,"Analizando"]
SEROUT 12,16780,[254,195,"Aguarde..."]
HIGH 6
GOTO seg

```

```

seg:
COUNT 1,250, cnt
tempo = tempo + 1
GOSUB freset
fpx=0
fpx=cnt
GOSUB FLoadInt
GOSUB Flog
GOSUB FSto0
fpxhigh=$8A59
fpxlow=$E127
GOSUB FLoadY
GOSUB Frcl0

```

```

GOSUB fSWAP
GOSUB Fdiv
GOSUB FSto1
fpxhigh=$8513
fpxlow=$C6C9
GOSUB FLoadY
GOSUB Frcl0
GOSUB Fmult
GOSUB FSto0
GOSUB Frcl1
GOSUB fxtoy
GOSUB Frcl0
GOSUB Fadd
GOSUB FSto0
fpxhigh=$8981
fpxlow=$7867
GOSUB FLoadY
GOSUB Frcl0
GOSUB Fadd
fpxhigh=$8548
fpxlow=$0000
GOSUB FLoadY
GOSUB Fmult
DEBUG DEC tempo,CRSRX, 15
DEBUG DEC fpx,CR
IF tempo = 1 THEN
TEMP = fpx
ENDIF
IF tempo = 125 THEN
menor = fpx
ENDIF
IF tempo = 155 THEN
maior = fpx
ENDIF
IF tempo = 200 THEN
LOW 6
GOTO calculos1
ENDIF
GOTO seg

```

```

calculos1:
Delta = maior - menor
DEBUG ? menor
DEBUG ? maior
DEBUG ? delta
DEBUG ? temp
GOSUB freset
fpx=0
fpx=delta
GOSUB FLoadInt
fpxhigh=$8548
fpxlow=$0000
GOSUB FLoadY
GOSUB Fdiv
fpxhigh=$8249

```

```

fpxlow=$0E56
GOSUB FLoadY
GOSUB Fmult
fpxhigh=$8053
fpxlow=$3333
GOSUB FLoadY
GOSUB fSWAP
GOSUB Fdiv
fpxhigh=$7C5C
fpxlow=$4317
GOSUB FLoadY
GOSUB Fmult
fpxhigh=$887a
fpxlow=$0000
GOSUB FLoadY
GOSUB Fmult
GOSUB Fint
DEBUG ? fpx,"W/m C"
temp = temp/10
SEROUT 12,16780,[254,1]
SEROUT 12,16780,[254,12]
SEROUT 12,16780,["K= ",DEC fpxlow/1000,44,DEC fpxlow//1000," W/m.C",223]
SEROUT 12,16780,[254,197,DEC temp/10,44,DEC temp//10," C",223]
FREQOUT 5,140,2800
FREQOUT 5,140,3800
FREQOUT 5,140,3000
FREQOUT 5,250,3900

```

```

DO
BUTTON 8, 0, 255, 0, cont,1, bip
LOOP

```

```

erro:
FOR c = 1 TO 1
FREQOUT 5,300,2800,3000
FREQOUT 5,300,2800,3000
FREQOUT 5,300,2800,3000
NEXT

```

```

DO
SEROUT 12,16780,[254,1]
SEROUT 12,16780,[254,12]
SEROUT 12,16780,[20,20,20,20,20,"ERRO!"]
PAUSE 1000
SEROUT 12,16780,[254,1]
SEROUT 12,16780,[20,20,"TEMPERATURA"]
SEROUT 12,16780,[254,195,"OSCILANDO"]
PAUSE 1200
SEROUT 12,16780,[254,1]
FREQOUT 5,40,2800,3000
LOOP

```

```

FReset:
LOW DATAP
LOW CLK

```

```
HIGH CLK
HIGH DATAP
LOW CLK
RETURN
```

```
Fwaitdata:
INPUT DATAP
IF DATAPIN=1 THEN Fwaitdata
RETURN
```

```
FChs:
fpb=10
FSendByte:
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[fpb]
RETURN
```

```
fexp:
  fpb=28
  GOTO fpstats
```

```
FSto0:
fpb=18
```

```
fstx:
GOSUB FSendByte
fpb=1
GOTO FSendByte
```

```
FXtoY:
  fpb=$17
  GOTO FSendByte
```

```
FSto1:
fpb=18
fstx1:
GOSUB FSendByte
fpb=2
GOTO FSendByte
```

```
FRcl0:
fpb=19
GOTO fstx
```

```
FLoadX:
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[1,fpxb3,fpxb2,fpxb1,fpxb0]
RETURN
```

```
FLoadY:
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[2,fpxb3,fpxb2,fpxb1,fpxb0]
RETURN
```

```
FLoadInt:
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[1,0,0,fpX.HIGHBYTE,fpX.LOWBYTE]
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[7]
GOTO fpstat
```

```
FInt:
```

```
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[11]
GOSUB Fwaitdata
SHIF TIN datap,clk,MSBFIRST,[fpstatus]
IF fpstatus<>0 THEN FInterr
```

```
FreadX:
  fpb=3
  GOSUB FSendByte
  SHIF TIN datap,clk,MSBP RE,[fpxb3,fpxb2,fpxb1,fpxb0]
  fpx = fpxlow
  FInterr:
  RETURN
```

```
FSwap:
  fpb=4
  GOTO FSendByte
```

```
FMult:
  fpb=12
  fpstats:
  GOSUB FSendByte
  fpstat:
  GOSUB FWaitdata
  SHIF TIN datap,clk,MSBP RE,[fpstatus]
  RETURN
```

```
FDiv:
  fpb=13
  GOTO fpstats
```

```
FSto:
  fpb=18
  fstox:
  GOSUB FSendByte
  fpb=fpx
  GOTO FSendByte
```

```
FRcl:
  fpb=19
  GOTO fstox
```

```
FRcl1:
  fpb=19
  GOTO fstx1
```

```
FAdd:
  fpb=15
  GOTO fpstats
```

```
flog:
  fpb=26
  GOTO fpstats
```

```
FSub:  
fpb=14  
GOTO fpstats
```

```
FGetDigit:  
SHIFTOUT datap,clk,MSBFIRST,[5,fpv]  
Fgetdigw:  
GOSUB fwaitdata  
SHIFTOIN datap,clk,MSBPRE,[fpdigit]  
RETURN
```

```
FDump:  
fdj VAR Byte  
fdnz VAR Bit  
fdjj VAR Byte  
fdjj=fpv  
fpv=0  
fdnz=0  
GOSUB FgetDigit
```

```
IF fpdigit="+" OR fpdigit=" " THEN Fdumpppos  
DEBUG fpdigit  
Fdumpppos:  
FOR fdj=1 TO fdjj  
fpv=fdjj+1-fdj  
GOSUB FgetDigit  
IF fpdigit="0" AND fdnz=0 THEN FdumpNext  
fdnz=1  
DEBUG fpdigit  
Fdumpnext:  
NEXT  
DEBUG ". "  
FOR fpv=$81 TO $86  
GOSUB FgetDigit  
DEBUG fpdigit  
NEXT  
RETURN
```