

Medidor de Fluxo de Seiva com Balanço de Calor Caulinar

Agesandro Caetano Corrêa

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Informação

José Sérgio da Rocha Neto
Orientador

Bernardo Barbosa da Silva
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

© Agesandro Caetano Corrêa

C824m Corrêa, Agesandro Caetano
2002 Medidor de fluxo de seiva com balanço de calor caulinar/
Agesandro Caetano Corrêa. - Campina Grande: UFCG, 2002.
88 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - UFCG/CCT/DEE
Inclui bibliografia

1. Fluxo de seiva 2. Balanço de calor caulinar 3. Controle de fluxo
de calor I.Título

CDU: 621.362




MEDIDOR DE FLUXO DE SEIVA COM BALANÇO DE CALOR CAULINAR

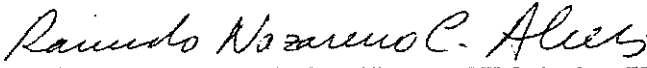
AGESANDRO CAETANO CORRÊA

Dissertação Aprovada em 06.12.2002


PROF. JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Orientador


PROF. BERNARDO BARBOSA DA SILVA, Dr., UFCG
Orientador


PROF. PERICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFCG
Componente da Banca


PROF. RAIMUNDO NAZARENO CUNHA ALVES, D.Sc., UFPA
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Dezembro - 2002

Dedicatória

Dedico em memória dos meus pais.

Agradecimentos

Agradeço aos professores José Sérgio e Bernardo pela orientação, aos colegas Raimundo Nazareno e Francisco Santos pelo auxílio nas revisões de texto, Simões Soares de Toledo pelo desenho das placas de circuito impresso, aos professores do Departamento de Elétrica da UFCG pelos ensinamentos, aos colegas e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica COPELE-CCT-UFCP, em especial ao Antenor e Marony pela companhia nos estudos, ao CEFET-PA e ao CNPq pelo apoio financeiro, à minha filha Geysa Corrêa pela compreensão e pela ajuda na edição do texto final junto com o Tomás Lobato.

Resumo

Métodos de medida de fluxo de seiva em plantas tem muita importância para a agricultura irrigada e estudos de fisiologia. Este trabalho descreve a pesquisa efetuada para projetar e construir um protótipo de medidor de fluxo de seiva com sistema de armazenamento de dados que usa o método de balanço de calor caulinar com aquecimento constante. O desempenho do protótipo do instrumento foi testado com um simulador de caule de planta que consiste de um tubo plástico (20 mm de diâmetro) preenchido com fibra de celulose, por onde se faz passar água com um fluxo conhecido. O fluxo de água medido pelo instrumento durante este experimento ficou sempre dentro da faixa de 10% do fluxo conhecido. Outro teste de desempenho foi realizado comparando o fluxo de seiva medido pelo instrumento em uma planta com o caule de 20 mm de diâmetro e o valor medido por um lisímetro de pesagem. Este experimento indicou que os fluxos de seiva medidos pelo instrumento ficaram também sempre dentro de uma faixa de 10% dos valores de fluxo de seiva fornecidos pelo lisímetro. Estes resultados experimentais obtidos pelo protótipo criado como parte desta pesquisa indicam que este instrumento pode ser usado eficazmente para aplicações agrícolas em condições de campo.

Abstract

Methods to measure the sap flow in plants are important for the agricultural practice in irrigated areas and for plant physiology studies. This report describes the research undertaken to design and to build a sap flow measuring device with a datalogger that is based on the method to determine stem heat budget under constant heating conditions. The performance of the instrument prototype was tested using a plant stem simulator consisting of a plastic tube (20 mm diameter) filled with cellulose fiber through which water flowed at a known flow rate. The water flow measured by the instrument in this experiment was always within 10% of the known water flow value. Another performance test was done comparing the sap flow measured by the instrument for a plant with a 20 mm stem diameter and the value obtained by a weighting lysimeter. This experiment indicated that the instrument measured sap flow values were also always within a 10% range of the sap flow readings provided by the lysimeter. The experimental results obtained by the prototype developed from this research indicate that the instrument can be effectively used in agricultural field applications.

Conteúdo

1. Introdução	1
1.1. Medida de fluxo de seiva	2
1.2. Sonda de medida de fluxo de seiva	3
1.3. Coleta e armazenamento de sinais analógicos	5
2. Princípio do balanço de calor	7
2.1. Princípio do balanço de calor com aquecimento constante	7
2.2. Detalhes construtivos da sonda	11
2.3. Considerações sobre a teoria utilizada no protótipo da sonda	14
3. Considerações específicas para o projeto (teoria básica)	15
3.1. Introdução	15
3.2. Amplificador de alto ganho	15
3.3. Conversor A/D	15
3.4. Microcontrolador	16
3.5. Perturbações elétricas em medida de baixos níveis de tensão	17
3.5.1. Ruído térmico	17
3.5.2. Efeito termoelétrico	18
3.5.3. Campos magnéticos	19
3.5.4. Aterramento e disposição de componentes do equipamento	19
3.5.5. Efeito de retificação em estágio de entrada de amplificador de alto ganho ..	20
3.6. Termopar	21
3.6.1. Faixa de temperatura do termopar tipo T	22
3.6.2. Erro do termopar tipo T	22
3.6.3. Condições de medida	22
3.6.4. Fabricação de elementos termopares	23
3.6.5. Características termoelétricas do termopar tipo T cobre-constantan	23
3.6.6. Coeficiente de Seebeck do termopar tipo T	25
4. Projeto e construção do protótipo do medidor de fluxo de seiva (MFS)	28
4.1. Introdução	28
4.2. Módulo de controle, coleta e armazenamento dos sinais analógicos ADuC812QS	29
4.3. Amplificador de termopar	30
4.4. Amplificador de potência	32
4.5. Teclado	33
4.6. Painel indicador	34

4.7. Relógio de 2 segundos	35
4.8. Regulador de tensão da fonte de energia	36
4.9. Módulo da sonda de fluxo de seiva	37
4.10. Fonte de tensão de microvolts	42
4.11. Programa de controle de aquisição de dados e interface homem máquina	44
4.11.1. Valores registrados e comunicação serial	47
4.12. Processamento de dados coletados	50
5. Experimentos	56
5.1. Introdução	56
5.2. Testes e calibração dos amplificadores de termopar	56
5.2.1. Variação do zero em instrumentos de medidas	59
5.3. Simulador de caule de planta	59
5.3.1. Montagem do simulador de caule de planta	60
5.3.2. Sistema de medida de fluxo por meio volumétrico	60
5.3.3. Calibração do sistema de medida de fluxo por meio volumétrico	62
5.3.4. Testes no simulador	65
5.3.5. Avaliação dos resultados no simulador	66
5.4. Testes de medidas em plantas	67
5.4.1. Espécime sob medida e lisímetro de pesagem	67
5.4.2. Registro e processamento dos dados coletados da planta	70
5.4.3. Resultados de medidas de fluxo de seiva da planta	70
6. Conclusões	73
6.1. Dificuldades	73
6.2. Propostas de novos trabalhos	74
Bibliografia	76
Apêndice A: Tabela de classificação dos métodos de medida de fluxo de seiva em plantas	84
Apêndice B: Leiaute das placas de circuito impresso	85
Apêndice C: Código fonte do programa de controle e aquisição de dados	89

Lista de símbolos e abreviaturas

Q	energia térmica (W)
Q_f	energia transportada pelo fluxo de massa da água (W)
q_u, q_d	energias conduzidas pelo caule, no sentido contrário ao fluxo de seiva e no mesmo sentido do fluxo de seiva, respectivamente (W)
q_s, Q_r	energia perdida para o meio ambiente (W)
C_p	calor específico da água ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
λ	condutividade térmica ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
λ_s, K_{co}	condutividade térmica do material do sensor ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
C_{st}	capacidade térmica do segmento de caule aquecido ($J\ m^{-3}\ ^\circ C^{-1}$)
F	razão de fluxo ($kg\ s^{-1}$)
u	densidade de fluxo de seiva ($m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$)
T	temperatura ($^\circ C$)
T_d	temperatura média da água saindo do segmento ($^\circ C$)
T_u	temperatura média da água entrando no segmento ($^\circ C$)
$\Delta T, dT$	diferença de temperatura ($^\circ C$)
S_u, S_d, S	áreas das secções transversais (m^2)
$\Delta x, dX$	variação de distância (m)
L	comprimento do segmento de caule (m)
r_1 e r_2	raios internos e externos do sensor (m)
V	volume do segmento de caule aquecido (m^3)
I	corrente elétrica (A)
E	tensão elétrica (V)
Δt	intervalo de tempo (s)

Cs	Coeficiente de Seebeck
k	Constante de Boltzmann
HPV	Heat Pulse Velocity (Velocidade de pulso de calor)
CHPV	Compensation Heat Pulse Velocity (Velocidade de pulso de calor com compensação)
SHB	Segment Heat Balance (Balanço de calor em segmento de caule)
THB	Tissue Heat Balance (Balanço de calor no tecido)
HDP	Heat Dissipation Probe (Sensor de dissipação de calor)
HFC	Heat Flux Control (Controle de fluxo de calor)
A/D	Analógico digital
ANSI	American National Standards Institute.
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
cc	Corrente contínua
CMRR	Common Mode Rejection Ratio (Rejeição de modo comum)
CR	Carriage Return (Retorno de carro).
FEM	Força eletromotriz
FPB	Filtro passa baixas
LF	Line Feed (Nova linha)
Offset	Deslocamento de nível contínuo
rms	Root Means Square (Raiz média quadrática)
LED	Light Emitter Diode (Diodo Emissor de Luz)

RELAÇÃO DE TABELAS

3.1	Limite de temperatura versus diâmetro do fio para o termopar tipo T . . .	22
3.2	Coeficiente de Seebeck para o termopar tipo T em função da temperatura da junção de referência, obtida a partir das tabelas da norma ANSI MC96.1 1975	26
4.1	Resultado da calibração do amplificador de potência, com valores obtidos sobre a resistência de aquecimento da sonda	33
4.2	Variação da resistência do aquecedor com a temperatura	42
4.3	Resultado da calibração da fonte de tensão (microvolts), usando um multímetro digital Agilent 34401A de 6 ½ dígitos	43
4.4	Parte da tabela de processamento dos dados obtidos no registro de fluxo de seiva de uma planta, com valores das constantes usadas para o cálculo do fluxo de seiva	51
5.1	Tabela obtida da calibração manual do módulo de coleta de dados, composto pelo amplificador de termopar e conversor A/D	57
5.2	Resultados obtidos da calibração dos amplificadores de termopar	59
5.3	Resultado da calibração do sistema de medida de fluxo por meio volumétrico	63
5.4	Resultado obtido das leituras de fluxo no caule da planta	72

RELAÇÃO DE FIGURAS

2.1	Balanço de calor em um segmento de caule	8
2.2	Corte descritivo da sonda de 5 canais proposta por SAKURATANI (1981), mostrando o diagrama de ligação dos termopares	11
2.3	Corte descritivo da sonda de 4 canais proposta por STEINBERG et al. (1990), mostrando o diagrama de ligação dos termopares	12
3.1	Diagrama de blocos funcionais do ADuC812	16
3.2	Esquema de aterramento usado no protótipo, com a separação do terra analógico do terra digital	20
3.3	Diagrama esquemático da placa do amplificador de termopar	21
3.4	Gráfico temperatura versus milivoltagem do termopar tipo T com a junção de referência em 0 °C, obtido de tabela da norma ANSI MC96.1 1975, na faixa de 0 a 400 °C	24
3.5	Gráfico temperatura versus milivoltagem do termopar tipo T usado para fazer a compensação, quando a junção de referência está com algum valor entre 0 e 50 °C, obtido de tabela da norma ANSI MC96.1 1975	25
3.6	Coefficiente de Seebeck para o termopar tipo T em função da temperatura da junção de referência na faixa de 0 a 50 °C	27
4.1	Diagrama de blocos do medidor de fluxo de seiva, incluindo a sonda de fluxo de seiva	29
4.2	Configuração do amplificador de termopar mostrando a faixa de variação máxima de sinal nas várias etapas	31
4.3	Diagrama esquemático do amplificador de potência	32
4.4	Diagrama esquemático do teclado	34
4.5	Diagrama esquemático do circuito de acionamento do painel indicador	35
4.6	Diagrama esquemático do regulador da fonte de energia	37
4.7	Diagrama de ligação dos termopares proposto por OLIVEIRA & SILVA (2000)	38
4.8	Vista interna da montagem, não é mostrado as ligações posteriores dos termopares de fluxo vertical para não confundir com o circuito da termopilha	40

4.9	Esquema de ligação dos termopares e aquecedor no conector que liga a sonda ao módulo de controle e aquisição de dados, na figura co representa o fio de constantan e cu o fio de cobre do termopar	41
4.10	Diagrama esquemático da fonte de tensão de microvolts	43
4.11	Fluxograma do programa principal de controle de coleta de dados	45
5.1	Gráficos obtidos de calibração manual do modulo de coleta de dados compostos pelo amplificador de termopar e conversor A/D	58
5.2	Simulador de caule de planta e sistema de medida de fluxo por meio volumétrico	61
5.3	Diagrama esquemático do sistema de medida de fluxo volumétrico	62
5.4	Variação do volume da gota em função do fluxo em gotas/segundo	64
5.5	Registro da leitura da sonda e valor de fluxo medido por meio volumétrico no simulador de caule de planta	65
5.6	Gráfico comparativo da leitura da sonda e valor de fluxo medido no simulador de caule de planta	66
5.7	Fotografia do lisímetro de pesagem com o medidor de fluxo de seiva	69
5.8	Resultado obtido das leituras de fluxo no caule da planta	71

1. Introdução

Métodos de medida da transpiração de água pelas plantas vêm sendo objeto de várias pesquisas desde o início do século XVIII, quando Stephen Hales observou que as plantas consomem uma quantidade de água muito maior que os animais. Ele calculou que um girassol, volume por volume, absorve e transpira 17 vezes mais água que um homem, em 24 horas. As medidas de transpiração das plantas em ambiente controlado, como é o caso de lisímetros (ambiente onde é feito o balanço de água) são muito fáceis de se realizar em laboratórios, porém estas medidas implicam na remoção da planta de seu ambiente natural. Além disso, os custos das instalações, que incluem estufas e balanças de grande capacidade (da ordem de 20 a 100 kg, dependendo do tamanho da planta) e alta precisão (da ordem de 1% ou menor), são muitos elevados. Estas exigências são necessárias pois se deve pesar o sistema composto pelo vaso, o solo, e a planta, visto que a variação na transpiração é muito pequena em relação ao peso total do lisímetro. Estes custos e dificuldades operacionais são motivos que levam à escolha de outras técnicas de medida da transpiração das plantas tais como os medidores de fluxo de seiva (DEVITT et al., 1993).

Na agricultura irrigada é importante minimizar as perdas de água, principalmente por percolação ou escoamento superficial, pois além do desperdício da água e energia necessária ao seu bombeamento, esta pode levar os fertilizantes usados para os aquíferos, causando a poluição destes. Ao mesmo tempo, é necessário ter uma irrigação suficiente para manter a umidade do solo em níveis aceitáveis para o bom desenvolvimento das plantas e garantia de rendimento que assegure a viabilidade econômica do empreendimento. A transpiração de água pelas plantas em uma agricultura, dependendo de vários fatores e da espécie vegetal, representa cerca de 60% da evapotranspiração (evaporação no terreno mais a transpiração das plantas) de uma plantação (SILVA et al., 2000), sendo uma variável importante no controle de irrigação. Além disso, a medida do fluxo da seiva ascendente no xilema dos troncos das árvores tem uma implicação nos campos da hidrologia e fisiologia (SWANSON, 1994).

1.1. Medida de fluxo de seiva

Sendo uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico da agricultura, o fluxo de água transpirado pelas plantas tem sido constante objeto de pesquisa. Entre os vários métodos usados para medir a transpiração pode-se citar:

- lisímetros volumétricos (drenagem) ou gravimétricos (lisímetro de pesagem) (DEVITT et al., 1993; DUGAS, 1990)
- potômetros (MAIER-MAERCKER, 1997)
- método do cloreto de cobalto ou outros tipos de elementos marcadores de fluxo de seiva (KALMA et al., 1998; WARING & ROBERTS, 1979)
- sondas que medem o fluxo de seiva no caule (SMITH & ALLEN, 1996)
- coleta e pesagem do vapor de água condensado
- medição por absorção de radiação infra-vermelha
- micrometeorologia e outros (ANGELOCCI, 2001)

Estes métodos geralmente medem: a água absorvida pelas raízes, como é o caso dos lisímetros; ou medem o fluxo de água nos caules e ramos da planta, como as tintas marcadoras de seiva; ou medem o vapor de água transpirada pelas folhas para a atmosfera, como no caso da micrometeorologia (SWANSON, 1994).

Cada método possui suas características. Alguns necessitam o corte da planta ou de galhos, como o potômetro de bolha, onde a parte cortada da planta é fixada a um tubo capilar horizontal cheio de água. A velocidade do movimento de uma bolha introduzida no tubo indica a taxa de absorção de água. Outros precisam de calibrações com padrões conhecidos, como é o caso da medição de radiação infra-vermelha, e alguns não têm valores de leitura contínuos no tempo, como é o caso da coleta e pesagem do vapor de água condensado em plástico que envolve a copa (ou ramo) da planta.

Para se fazer o controle automático de irrigação de uma cultura, é necessário que o valor medido da transpiração das plantas, seja contínuo no tempo e facilmente convertido em sinal elétrico analógico. A seguir apresentam-se alguns dos métodos mais usados de sondas de fluxo de seiva que utilizam o calor como elemento marcador do fluxo.

1.2. Sonda de medida de fluxo de seiva

As vantagens de se utilizar um sensor capaz de medir o fluxo de seiva no caule ou ramo de uma planta sem interferir nas suas atividades fisiológicas, foi logo observada e buscada por vários pesquisadores.

Vários elementos marcadores do fluxo de seiva nos caules das plantas foram experimentados, tais como: tintas, isótopos (WARING & ROBERTS, 1979), eletromagnético (SHERIFF, 1972) e outros. Porém, o uso de calor como elemento marcador do fluxo de seiva é o que tem sido mais usado pela maioria dos pesquisadores, com várias dezenas de trabalhos publicados sobre o assunto (Apêndice A).

No uso do calor como elemento marcador do fluxo, existem basicamente três métodos, diferenciados quanto aos princípios de operação:

1) **Princípio do balanço de calor**, que é o método mais estudado atualmente, onde uma parte do caule é aquecida com um valor determinado, por meio elétrico, e o balanço de calor é usado para calcular a quantidade de calor transportado pelo movimento da seiva no caule. Inicialmente, Vieweg e Ziegler, em 1960, usaram o balanço de calor como uma indicação empírica do fluxo de seiva (SWANSON, 1994). Este método teve um desenvolvimento muito grande na sua parte teórica, com os trabalhos de SAKURATANI (1981), BAKER & VAN BAVEL (1987) e STEINBERG et al. (1990), que tornou o método quantitativo nos seus resultados.

2) **Método de pulso de calor**, onde curtos pulsos de calor são aplicados em sondas introduzidas no interior do caule e o fluxo de massa de seiva é determinado a partir da velocidade do movimento do pulso de calor ao longo do caule da planta. Este método foi desenvolvido inicialmente por Huber, na Alemanha em 1932 (SWANSON, 1994).

3) **Técnica de dissipação térmica**, proposta inicialmente por GRANIER (1985), usa um conjunto de duas sondas (2 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento) implantadas radialmente no caule. Uma das sondas é aquecida com uma potência constante e inserida acima (aproximadamente 5 cm) de uma outra, que mede a temperatura de referência do fluxo de seiva. Desta forma, é possível ter uma indicação da condutividade térmica do xilema ativo (que conduz seiva). O fluxo de seiva resulta em um acréscimo da condutividade térmica, causando um resfriamento da sonda aquecida. Este dispositivo (conjunto formado pelas duas sondas) é então calibrado em um padrão feito com um pedaço de tronco com diâmetro entre 40 a 50 mm, onde é feito circular água sob pressão. São medidos simultaneamente o fluxo de água que passa pela amostra e o sinal gerado pelas sondas. Um ajuste não linear conduz a uma relação experimental entre o fluxo de seiva e a diferença de temperatura indicada pela sonda (SWANSON, 1994).

Destes três métodos, o princípio do balanço de calor apresenta duas variações distinguidas pela forma de aquecimento introduzido no segmento do caule, que pode ser constante ou variável. No aquecimento constante, medem-se os diversos fluxos de calor (ascendente, descendente e radial) que saem do segmento aquecido (SAKURATANI, 1981). No aquecimento variável, o aquecimento é controlado de forma que os fluxos de calor sejam mantidos constantes (KITANO & EGUCHI, 1989).

O sinal gerado por este tipo de sonda é contínuo e pode ser facilmente convertido para um nível de tensão proporcional ao fluxo de seiva que está passando no caule da planta em um determinado instante. Isto permite registrar (armazenar) este sinal e processá-lo convenientemente de forma a ter várias informações sobre o consumo de água da planta ao longo do tempo.

No Anexo A encontra-se uma tabela resumo sobre métodos de medida de fluxo de seiva, descritos acima. Nesta tabela pode-se observar que cada método tem sua aplicação específica. Não há um único conjunto de teoria e instrumentação que seja aplicável a todos os tamanhos e espécies de plantas e árvores (SWANSON, 1994).

A seguir é apresentado o instrumental necessário à coleta de dados e o controle da sonda de fluxo de seiva.

1.3. Coleta e armazenamento de sinais analógicos

Para realizar o registro do sinal analógico gerado pela sonda de medida de fluxo de seiva é usado um sistema de aquisição de dados. O estudo das funções e características de um sistema de aquisição de dados é objeto de uma descrição detalhada neste trabalho. Os sistemas de aquisição de dados (*datalogger*) podem ser de uso geral e de uso específico.

Pode-se observar que, apesar de serem fabricados em linha de produção industrial, os sistemas de aquisição de dados de uso geral têm um preço bastante elevado; pois, além de incorporarem inúmeras funções (que não são completamente utilizados pelo usuário), possuem interface homem-máquina bem elaborado e geralmente são programáveis pelo usuário final. Este tipo de sistema vem sendo utilizado em pesquisas na UFPB, sendo o *datalogger* de uso geral fabricado pela Campbell (CAMPBELL SCIENTIFIC, INC, 2001).

O sistema de aquisição de dados dedicado a uma determinada aplicação é mais simples, tanto em relação ao seu manuseio pelo usuário, quanto a sua construção. Como é fabricado em conjunto com uma aplicação, o sistema de aquisição de dados dedicado tem seu custo incorporado à mesma, podendo ser minimizado gastos com material e programas de gerenciamento (INAMASU, 1996).

Este trabalho tem como principal objetivo fazer um estudo do método do balanço de calor caulinar com aquecimento constante e montar um protótipo de medidor de fluxo de seiva (MFS). Este protótipo é usado para verificar a técnica, comparando seus resultados com experiências usando um simulador de caule de planta e um lisímetro de pesagem com uma planta.

Todo o processo de montagem do protótipo do MFS é descrito. Um simulador de caule de planta com seu respectivo medidor de fluxo volumétrico também são detalhadamente projetados.

As medidas de fluxo são feitas no simulador e no lisímetro de pesagem para avaliar o método e o MFS desenvolvido.

O diferencial deste MFS em relação aos processos descritos nos artigos consultados e ao equipamento usado em instituições de pesquisa, é a proposta de construção de um sistema

integrado pela sonda de medida onde ocorre o balanço de calor e o sistema de controle e coleta de dados dedicados, formando um equipamento único com função específica, com custo muito inferior ao equipamento disponível comercialmente e com possibilidade de vir a ser usado rotineiramente no controle de irrigação de plantações. Apesar da integração do método ao dispositivo de medida, o processo continua aberto para avaliação dos dados coletados.

No capítulo 2 é feito o estudo do método. No capítulo 3 são levantados os aspectos de engenharia que são aplicados no projeto do protótipo do MFS. No capítulo 4 é apresentado o projeto do MFS e no capítulo 5 são descritos os experimentos realizados para avaliar o desempenho deste MFS.

2. Princípio do balanço de calor

O método de medida de fluxo de água no caule de plantas, usado neste trabalho, usa o princípio do balanço de calor. Este método foi selecionado por várias razões: é um método bem desenvolvido (com a contribuição de vários pesquisadores), tem sido usado em vários trabalhos de pesquisa na área de fisiologia vegetal, e pelo menos uma empresa (DYNAMAX INC., 2001) fornece comercialmente sensores baseado neste método, que podem ser usados em caules herbáceos e lenhosos com diâmetro de até algumas dezenas de milímetros. Tem um tempo de resposta suficientemente rápido, se comparado com a transpiração diária de uma planta, da ordem de 5 minutos, e gera um sinal contínuo no tempo.

Este método foi descrito inicialmente por SAKURATANI (1981), tendo recebido inúmeras contribuições para seu aperfeiçoamento (BAKER & VAN BAVEL, 1987; STEINBERG et al., 1990).

2.1. Princípio do balanço de calor com aquecimento constante

Neste método, parte do caule é selecionada para se fazer a medida de fluxo de seiva, de preferência com a constituição o mais uniforme possível e com o formato mais próximo possível de um cilindro. Considere este segmento (ilustrado na Figura 2.1) de comprimento L (m) (sendo L um valor aproximado entre uma a duas vezes o diâmetro, para facilitar o equilíbrio térmico e manter a temperatura uniforme em todo o volume do cilindro) (STEINBERG et al., 1989; WEIBEL & BOERSMA, 1995), por onde flui a água com uma razão constante ou com uma variação mais lenta que o tempo necessário para se atingir o equilíbrio térmico neste segmento. Na condição de equilíbrio térmico deste corpo tem-se:

$$Q = Q_f + q_u + q_d + q_s \quad (2.1)$$

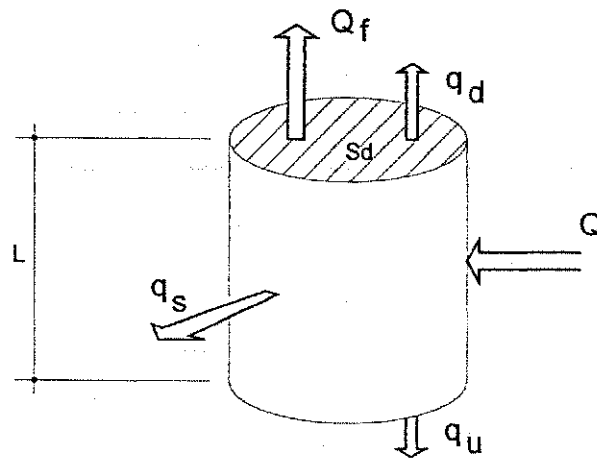


Figura 2.1: Balanço de calor em um segmento de caule

onde Q é a energia térmica fornecida ao segmento e mantida constante, Q_f é a energia transportada pelo fluxo de massa da água, q_u e q_d são as energias conduzidas pelo caule, no sentido contrário ao fluxo de seiva e no mesmo sentido do fluxo de seiva, respectivamente. A variável q_s é a energia perdida para o meio ambiente.

Nesta análise é considerado desprezível o calor perdido por radiação e a troca de calor latente entre o tronco e o meio ambiente. Para se conseguir isto, deve ser providenciado, uma boa blindagem e isolamento térmico do segmento aquecido e o meio ambiente.

A energia térmica que é transportada pelo fluxo de massa de água que atravessa o segmento, pode ser determinada por:

$$Q_f = C_p F (T_d - T_u) \quad (2.2)$$

onde C_p é o calor específico da água ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$), F é o fluxo ($kg\ s^{-1}$), T_d é a temperatura média da água saindo do segmento, e T_u é a temperatura média da água entrando no segmento.

Combinando as equações 2.1 e 2.2, tem-se:

$$F = \frac{Q_f}{C_p (T_d - T_u)} = \frac{Q - q_u - q_d - q_s}{C_p (T_d - T_u)}, \quad T_d \neq T_u \quad (2.3)$$

Assumindo que a temperatura é uniforme ao longo do raio de cada seção, pode-se considerar que T_d é igual em toda superfície superior e T_u é igual em toda a superfície inferior do segmento de tronco. A partir da equação unidimensional da condução de calor no cilindro, tem-se:

$$q_u = \lambda S_u \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.4)$$

$$q_d = \lambda S_d \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.5)$$

onde λ é a condutividade térmica do caule ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), S_u e S_d são as áreas das seções transversais do caule (m^2) e T a temperatura do tronco ($^\circ\text{C}$). A variação de temperatura dT/dx pode ser determinada pelo valor aproximado $\Delta T/\Delta x$, onde Δx é um valor pequeno comparado ao diâmetro do caule. Desta forma, determinando-se dois novos pontos de temperatura T'_u , abaixo de T_u , e T'_d , acima de T_d , respectivamente espaçados com uma distância Δx , pode-se reescrever as equações 2.4 e 2.5 como:

$$q_u = \lambda S_u \frac{(T_u - T'_u)}{\Delta x} \quad (2.6)$$

$$q_d = \lambda S_d \frac{(T_d - T'_d)}{\Delta x} \quad (2.7)$$

A condutividade térmica do caule da planta pode ser determinada pela combinação da condutividade térmica dos constituintes do caule (por exemplo: celulose, água e ar), multiplicados pelos volumes fracionais de cada componente, respectivamente. Observa-se que, se o caule contém mais de 90% de água, sua condutividade térmica é aproximadamente igual a da água.

A energia térmica Q (ver Figura 2.1) é fornecida ao segmento por meio de um aquecedor elétrico que envolve todo o segmento ao longo do comprimento L , e é mantida constante com o uso de uma fonte de tensão regulada. O seu valor é determinado por:

$$Q = I E \quad (2.8)$$

onde I é a corrente e E a tensão fornecidos pela fonte.

A perda de calor da superfície do segmento aquecido para o ar ambiente, q_s , é determinada por um sensor de fluxo de calor colocado em volta do segmento aquecido. Desta forma,

$$q_s = k_{sh} \Delta T_s \quad (2.9)$$

ΔT_s é a diferença de temperatura entre a superfície interna e externa do sensor e k_{sh} é o coeficiente que relaciona a condutividade térmica, a forma e tamanho do sensor de fluxo de calor ($W \text{ } ^\circ C^{-1}$) e é determinado por

$$k_{sh} = \frac{2 \pi \lambda_s L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.10)$$

onde λ_s é a condutividade térmica do material do sensor ($W \text{ m}^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$), L o comprimento do segmento de caule aquecido e r_1 e r_2 os raios interno e externo do sensor. A equação 2.10 é derivada da equação diferencial ordinária da condução de calor radial em uma casca de cilindro (BEJAN, 1996). Outra forma de se determinar k_{sh} é fazendo com que o fluxo de água no tronco seja zero. Isto pode ser conseguido à noite, cobrindo-se a planta ou cortando-se o caule. Com o fluxo de água nulo ($Q_f=0$), a equação 2.1 pode ser escrita da seguinte forma:

$$k_{sh} = \frac{Q - q_u - q_d}{\Delta T_s} \quad (2.11)$$

Desta forma, medindo-se os valores de diferenças de temperaturas $T_d - T_u$, $T_u - T_u'$, $T_d - T_d'$, ΔT_s e a tensão sobre o resistor de aquecimento (supondo que o valor de resistência não

varia), com um sistema de aquisição de dados analógico de 5 canais, e conhecendo-se o valor da condutividade térmica do caule, é possível determinar o fluxo de seiva (SAKURATANI, 1981).

2.2. Detalhes construtivos da sonda

Na sonda proposta por SAKURATANI (1981), as diferenças de temperaturas $T_d - T_u$, $T_u - T_u'$ e $T_d - T_d'$, nas equações 2.3, 2.6 e 2.7, são medidas com termopares de cobre-constantan de 0,25 mm de diâmetro. Conforme a configuração de ligação dos termopares ilustrada na Figura 2.2, estes três sinais estão ligados em série (somados). Desta forma, é necessário que as entradas do módulo de aquisição de dados sejam do tipo diferencial. A diferença de temperatura $T_d - T_u$ fica na faixa de 2 °C a 3 °C, e isto faz com que as tensões lidas nos termopares sejam da ordem de 80 a 120 μ V.

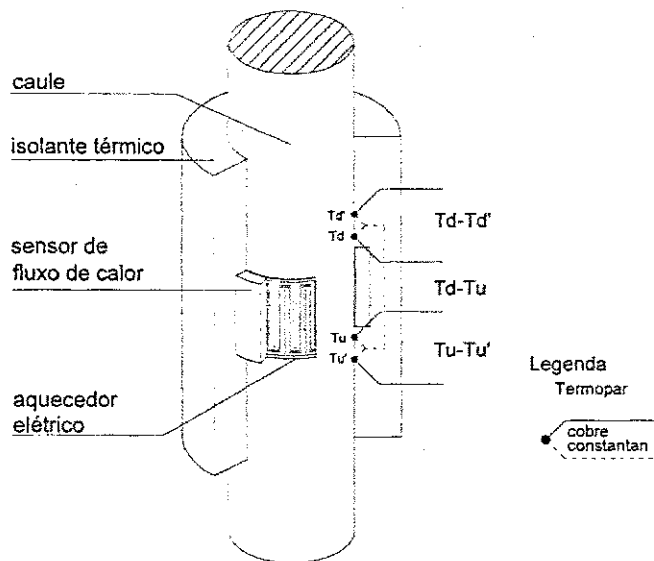


Figura 2.2: Corte descritivo da sonda de 5 canais proposta por SAKURATANI (1981), mostrando o diagrama de ligação dos termopares.

Outra configuração de ligação proposta por STEINBERG et al. (1990) tem os sinais de tensões gerados pelos termopares (A e B) com um ponto comum de referência (H), conforme visto na Figura 2.3. Com isto, pode-se usar amplificadores de termopar com entradas de modo comum, o que simplifica o módulo de aquisição. Além disso, como a distância entre as junções

são maiores, os níveis de tensões gerados pelos termopares são superiores aos gerados pela sonda proposta por SAKURATANI (1981).

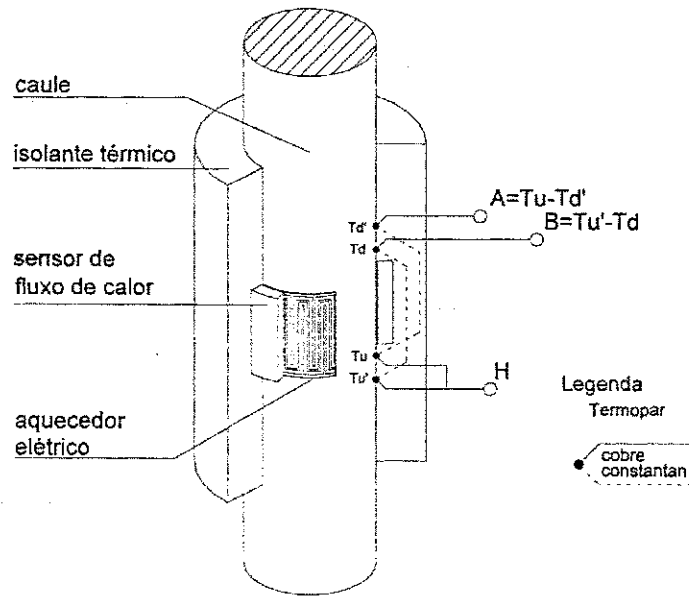


Figura 2.3: Corte descritivo da sonda de 4 canais proposta por STEINBERG et al. (1990), mostrando o diagrama de ligação dos termopares.

As equações 2.6 e 2.7 são combinadas determinando-se então a condução axial de calor $q_v = q_u - q_d$, sendo $S_u = S_d = S$, obtendo-se:

$$q_v = \frac{\lambda S}{\Delta x} [(T_u - T_u') - (T_d - T_d')] \quad (2.12)$$

Substituindo-se os valores lidos de $A = T_u - T_u'$ e $B = T_u' - T_d$ na equação 2.12 tem-se;

$$q_v = \frac{\lambda S}{\Delta x} (B - A) \quad (2.13)$$

O valor de $T_d - T_u$ na equação 2.2 é determinado pela média entre A e B. Assim, a equação 2.2 fica:

$$Q_f = C_p F \left(\frac{A+B}{2} \right) \quad (2.14)$$

Desta forma, observa-se outra grande vantagem introduzida por esta configuração: a necessidade de um sistema de aquisição de dados com apenas 4 canais analógicos simples (não diferenciais), para ler os valores de A, B, ΔT_c (canal C) e a tensão no resistor de aquecimento.

Outras modificações foram introduzidas na sonda proposta por SAKURATANI (1981), tais como o termo de energia armazenada e o controle do aquecedor para manter uma diferença de temperatura constante, entre a temperatura do caule abaixo do aquecedor e a temperatura do segmento aquecido. Com estes melhoramentos a precisão da sonda aumenta, sendo que o erro medido por SAKURATANI (1981), da ordem de 10%, chegou a ser inferior aos 5% nos experimentos de WEIBEL & BOERSMA (1995).

O termo de energia armazenada por unidade de tempo Q_a , é incluído na equação 2.1 e pode ser determinado da seguinte maneira:

$$Q_a = \frac{C_{st} V (T_1 - T_0)}{\Delta T} \quad (2.15)$$

sendo T_1 a temperatura média do segmento aquecido ($^{\circ}\text{C}$), ΔT o intervalo de tempo entre duas leituras consecutivas (s), T_0 o valor de temperatura lido imediatamente anterior de T_1 , C_{st} é a capacidade térmica do segmento de caule aquecido ($\text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e V é o volume do segmento de caule aquecido (m^3). Para determinação deste termo é necessária a medida da temperatura média absoluta do segmento de caule aquecido e isto representa a inclusão de mais um sensor de temperatura e respectivo canal de leitura analógica no sistema de aquisição de dados. O cálculo do balanço de calor usando o termo de energia armazenada no segmento aquecido é necessário quando o diâmetro do caule é maior que 30 mm (HAM & HEILMAN, 1990; GROOT & KING, 1992; GRIME et al., 1995b; WEIBEL & BOERSMA, 1995).

2.3. Considerações sobre a teoria utilizada no protótipo da sonda

No caso deste trabalho, a teoria utilizada no protótipo do medidor de fluxo de seiva (MFS), foi o de balanço de calor com aquecimento constante, utilizando uma sonda com as modificações propostas por STEINBERG et al. (1990), sendo usado apenas três canais (A, B e C) fornecidos pela sonda. O canal usado para a medida de tensão sobre o aquecedor não foi usado, pois o sinal de tensão gerado para este fim parte do sistema de controle e coleta de dados, sendo amplificado por um circuito auto-regulado. Desta forma, o registro desta informação é feito internamente ao programa de controle e coleta de dados.

O termo de energia acumulada por unidade de tempo, não foi utilizado neste trabalho, pois necessita de um sensor de temperatura absoluta que não foi implementado. Além disso, o sensor usado para esta medida é do tipo intrusivo. Outro motivo é que o diâmetro do caule usado nos testes da sonda (20 mm) é menor que o limite de 30 mm definido por WEIBEL & BOERSMA (1995).

A seguir são feitas as considerações específicas para o projeto e montagem do medidor de fluxo de seiva (MFS), o qual é considerado, como uma integração entre a sonda e o sistema de controle e coleta de dados, incluindo ainda os programas de controle e aquisição de dados e o programa de processamento dos dados obtidos.

3. Considerações específicas para o projeto (teoria básica)

3.1. Introdução

Para a implementação do medidor de fluxo de seiva é necessário uma sonda onde ocorre o balanço de calor e o sistema de controle e coleta de dados. A sonda é constituída pelo aquecedor e conjunto de termopares geometricamente montados para medir os fluxos de calor envolvidos no processo de balanço de calor. O sistema de controle e coleta de dados desenvolvido neste protótipo constitui-se de amplificadores dos sinais gerados pelos termopares da sonda, do microcontrolador com conversor A/D incorporado e memória de dados. A seguir são feitas algumas considerações importantes para a montagem do protótipo. Estas características resultam principalmente do fato de os termopares gerarem um nível de tensão muito pequeno (microvolts) neste tipo de aplicação.

3.2. Amplificador de alto ganho

Atualmente um amplificador linear de alto desempenho com uma fonte de alimentação única de baixa tensão (5V ou menos) é uma necessidade bastante comum, principalmente para instrumentos portáteis que devem operar com pilhas ou acumuladores recarregáveis. Os melhores desempenhos de amplificadores de instrumentação são conseguidos para operação com fonte dupla simétrica, porém, atualmente são disponíveis de vários amplificadores operacionais de fonte única de precisão, tais como: OP213, OP291, OP491 e o OP284 e alguns bons amplificadores de instrumentação de fonte única, tais como: INA118, INA114, AMP04 e o AD626.

3.3. Conversor A/D

O conversor A/D utilizado neste trabalho é um conversor de aproximações sucessivas de 12 bits, com um estágio de entrada de amostragem de carga usando um capacitor de 2pF, com tempo de conversão de 5 μ s.

Ele combina alta resolução com alta velocidade. É um conversor A/D do tipo de realimentação em que é usado um contador e um conversor D/A no laço de realimentação do circuito de controle digital que altera a saída até que seja igual a entrada. No caso do conversor de aproximações sucessivas, o conversor D/A é controlado de uma maneira ótima para completar a conversão em n passos, onde n é a resolução do conversor em bits (ZUCH, 1982).

3.4. Microcontrolador

O microconversor ® ADuC812 é um circuito integrado que contém um sistema de aquisição de dados de 12 bits com um conversor A/D multicanais, auto-calibrado e um microcontrolador compatível com o 8051 de 8 bits.

O núcleo compatível com o microcontrolador 8051 possui uma memória de programa de 8K bytes do tipo Flash/EE, memória de dados com 640 bytes do tipo Flash/EE e 256 bytes de memória de dados SRAM. O diagrama em blocos do microconversor ADuC812 é apresentado na Figura 3.1.

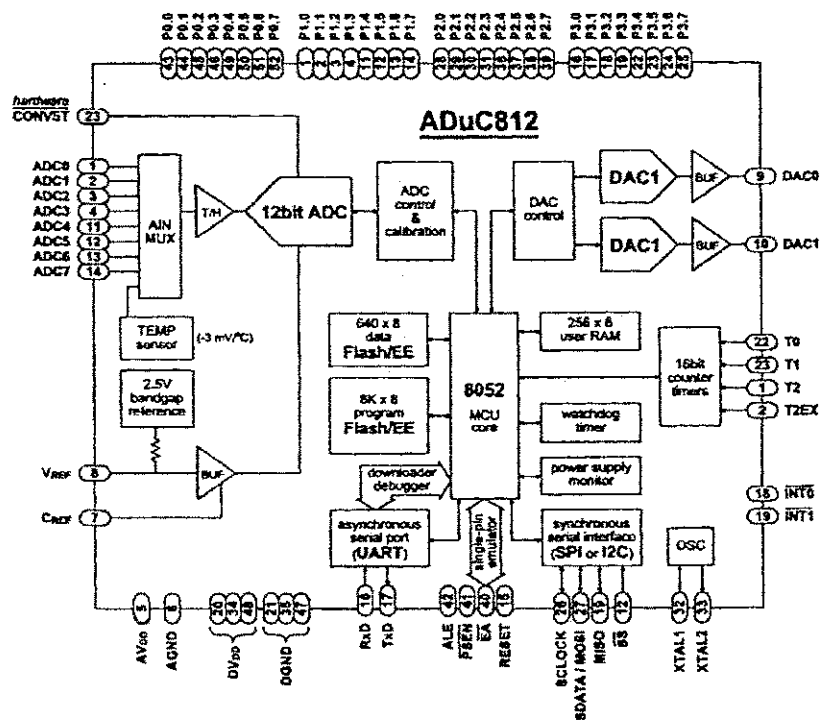


Figura 3.1: Diagrama de blocos funcionais do ADuC812

3.5. Perturbações elétricas em medida de baixos níveis de tensão

Quando se está medindo baixos níveis de tensão, como os gerados por termopares, deve-se ter cuidados especiais. A seguir são feitas algumas considerações sobre aspectos que julgamos importantes neste tipo de medida.

Aspectos como o ruído térmico gerado principalmente pelos resistores, não podem ser evitados, devendo-se apenas verificar se sua influência não afeta significativamente os resultados da medida. Outros aspectos, como o efeito termoelétrico e interferências eletromagnéticas podem ser convenientemente filtrados para separar o sinal de interesse do ruído, ou feitas blindagens para que a interferência não atinja a parte sensível do circuito.

3.5.1. Ruído térmico

O limite teórico de sensibilidade de um instrumento é determinado pelo ruído térmico gerado pelas resistências envolvidas no circuito. A tensão do ruído é proporcional à raiz quadrada da resistência interna da fonte, largura da faixa de frequência e temperatura absoluta.

O limite fundamental para medidas de tensão é determinado pelo ruído Johnson na resistência interna da fonte de tensão. Em qualquer resistência, a energia térmica produz movimento de partículas com cargas elétricas. Este movimento de cargas gera um ruído que é denominado de ruído Johnson ou ruído térmico. A potência associada a este movimento é determinada por:

$$P = 4 k T \Delta f \quad (3.1)$$

onde

k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J } ^\circ\text{K}^{-1}$)

T : temperatura em $^\circ\text{K}$

Δf : faixa de frequência do ruído em Hz

Em condutores metálicos o valor de P se aproxima deste valor teórico, enquanto em outros materiais é superior. A tensão do ruído Johnson desenvolvida sobre um resistor R é:

$$E = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad \text{volts, rms} \quad (3.2)$$

Considerações estatísticas mostram que a tensão do ruído pico a pico é cerca de cinco vezes superior ao valor do ruído rms durante mais de 99% do tempo. Portanto, o nível rms é comumente multiplicado por cinco para se converter para valor pico a pico (KEITHLEY, 1984).

Para os valores apresentados no diagrama esquemático da Figura 1, sendo: resistência do termopar $1,2 \Omega$, resistência do filtro passa baixas $2 \times 511 \Omega$, faixa de frequência 1 Hz, temperatura ambiente $300 \text{ }^\circ\text{K}$, pode-se calcular o ruído térmico gerado pelo termopar em conjunto com o filtro passa baixas, obtendo-se um valor de cerca de $0,02 \mu\text{V}$ pico a pico. Este valor é cerca de 20 vezes menor que a resolução do sistema de medida, composto pelo amplificador de termopar, com ganho de aproximadamente 1500, e pelo conversor analógico digital de 12 bits com uma variação de 0 a 2,5 V na entrada (aproximadamente $0,4 \mu\text{V/div}$). Para o bom funcionamento do sistema de medida é necessário que a tensão pico a pico do ruído térmico seja menor que a metade da resolução.

Devido à sua baixa resistência interna equivalente, o nível de ruído térmico gerado pelo termopar é muito pequeno comparado com o nível do sinal. Esta é uma das vantagens de se usar o termopar como elemento de medida de pequenas diferenças de temperatura.

3.5.2. Efeito termoelétrico

A tensão gerada pelo efeito termoelétrico é uma das mais comuns fontes de erro nas medidas de baixos níveis de tensão (milivolts e microvolts). Esta tensão resulta quando diferentes partes de um circuito estão em temperaturas diferentes e/ou quando condutores feitos de materiais diferentes são unidos. A blindagem térmica dos circuitos de alto ganho é uma exigência que não pode ser negligenciada. Apenas uma corrente de ar em partes diferentes do circuito é suficiente para alterar os sinais de entrada (VAN PUTTEN, 1996). Esta blindagem consiste em um invólucro de um material altamente condutor de calor, o alumínio é o mais usado.

3.5.3. Campos magnéticos

O movimento de fios condutores de um circuito em um campo magnético gera tensões espúrias. Até o fraco campo magnético da Terra pode gerar tensão da ordem de nanovolts em condutores que estão vibrando. Por isso, os condutores devem ser fixados em uma base rígida.

A física básica mostra que o valor da tensão induzida por um campo magnético é proporcional a área que os condutores circundam. Assim, os condutores devem permanecer os mais juntos possíveis; também pode ser usada blindagem magnética com ligas de alta permeabilidade magnética. Adicionalmente, os sinais de tensão alternada, gerados pela indução magnética, podem ser filtrados na entrada dos instrumentos de medida.

3.5.4. Aterramento e disposição de componentes do equipamento

As características de alta resolução (12 bits) do conversor de dados e baixos níveis de tensão (μV) gerados pelo sensor exigem atenção especial nos aspectos de aterramento do circuito e disposição dos componentes na montagem do MFS, com o objetivo de se conseguir um bom desempenho do equipamento.

Na placa de desenvolvimento ADuC812QS é usada uma configuração de separação dos planos de terra analógico e digital, que apresenta bom desempenho para minimizar a interferência dos ruídos gerados pelos circuitos digitais nos circuitos analógicos.

Esta configuração consiste em planos de terra separados na placa de circuito impresso, um para o posicionamento dos componentes digitais e outro para os componentes analógicos, conforme ilustrado na Figura 3.2. Um único ponto interliga estes dois planos o mais próximo possível do microconversor ADuC812 onde está o conversor analógico-digital. As placas adicionais do protótipo possuem o seu ponto de terra interligado ao plano de terra correspondente na placa de desenvolvimento (conforme mostrado na Figura 3.2). Este tipo de disposição dos componentes separados em seus respectivos planos de terra, evita que as correntes de retorno dos circuitos digitais fluam próximo aos circuitos analógicos e vice-versa.

Na montagem do protótipo deve-se sempre considerar que o caminho de retorno de todas as correntes deve estar o mais próximo possível do caminho que a corrente percorre para chegar no destino, evitando grandes laços abertos.

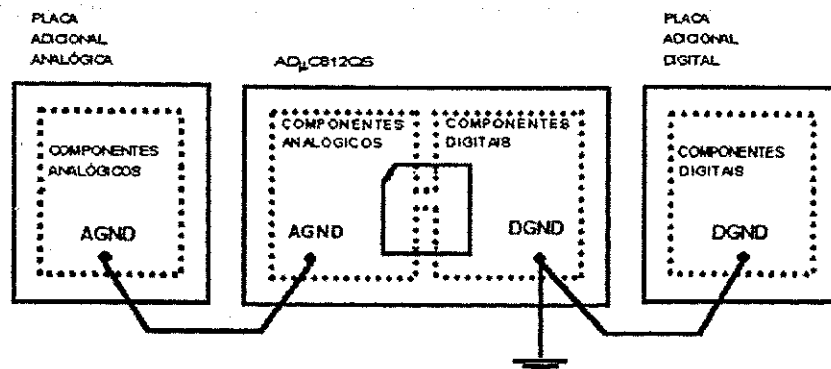


Figura 3.2: Esquema de aterramento usado no protótipo, com a separação do terra analógico do terra digital.

3.5.5. Efeito de retificação em estágio de entrada de amplificador de alto ganho

Um efeito bem conhecido em circuitos integrados analógicos é a retificação de interferência na faixa de rádio frequências, particularmente em amplificadores de instrumentação e amplificadores operacionais. Enquanto amplificam sinais de valores muito baixos (da ordem de mV), estes dispositivos podem retificar sinais indesejáveis de alta frequência, fora da banda de frequência dos sinais. Este efeito causa um erro no nível de tensão contínua na saída, adicionado ao sinal de entrada desejado.

Isto ocorre porque todo estágio de entrada de um amplificador operacional ou de instrumentação, possui um par diferencial de transistor de junção bipolar acoplado por emissor ou um par diferencial de transistor de efeito de campo acoplado pela fonte com carga resistiva ou fonte de corrente. Dependendo do nível de corrente de polarização nestes dispositivos e da frequência de interferência, este par diferencial pode se comportar como um retificador de alta frequência. O nível de corrente contínua, gerado por esta retificação, altera os níveis de polarização dos estágios de entrada, causando erros que produzem imprecisões no amplificador.

Para se prevenir sinais e ruídos indesejados na entrada, são usadas técnicas de filtragem. Como mostrado na Figura 3.3, um filtro passa baixa é usado em série com a entrada diferencial. Neste filtro, os capacitores CX1, CX2 e CX3, são ligados entre as entradas do amplificador de instrumentação, sendo que o filtro passa baixa de modo comum é formado por CX1 e CX2 e o filtro passa baixa de modo diferencial formado por CX3, ambos com os dois resistores RX em série. A constante de tempo RX-CX1 e RX-CX2 deve ser bem casada (melhor que 1%), porque o desequilíbrio nestas impedâncias pode gerar uma tensão de erro diferencial que será amplificada.

Por outro lado, um benefício adicional de se usar capacitor conectado de forma diferencial é que ele pode reduzir o desequilíbrio nos capacitores de modo comum. Esta ligação diferencial ajuda a preservar a rejeição de modo comum de altas frequências. Como são requeridos resistores em série para formar o filtro passa baixa, erros devidos a um arranjo de componentes na placa de circuito impresso mal feito (desbalanceamento da CMRR), tolerância dos componentes RX (tensão de offset induzida pela corrente de polarização da entrada) e o ruído térmico dos resistores, devem ser considerados no processo de projeto do circuito amplificador (GARCIA, 1995).

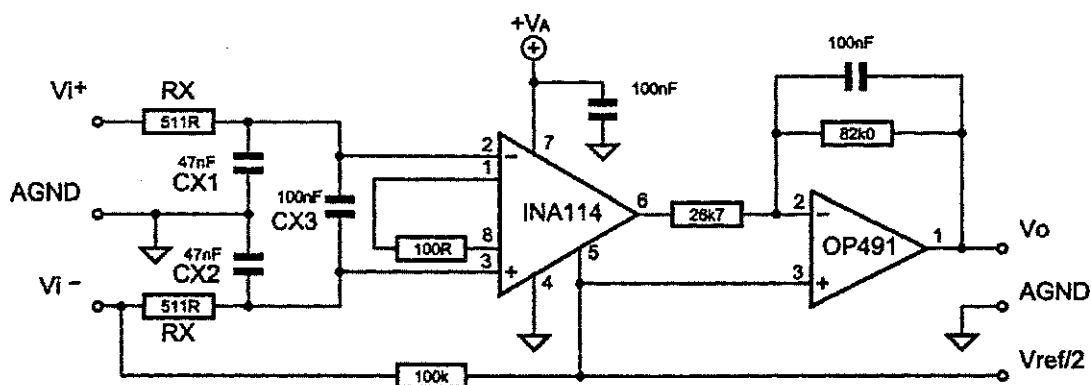


Figura 3.3: Diagrama esquemático da placa do amplificador de termopar.

3.6. Termopar

Em 1821, Seebeck descobriu que em um circuito fechado feito de dois fios de metais diferentes, uma corrente elétrica flui neste circuito se a temperatura de uma junção é diferente da outra. Desde essa época o efeito termoelétrico tem sido estudado, sendo identificados três efeitos

que, apesar de diferentes, estão inter-relacionados. O efeito Seebeck, que é o relevante para os termopares, enquanto os efeitos Peltier e Thomson descrevem o transporte de calor por uma corrente elétrica. Apesar da baixa sensibilidade, os termopares são usados como sensor de temperatura devido sua simplicidade e confiabilidade.

3.6.1. Faixa de temperatura do termopar tipo T

O termopar tipo T é normalmente usado em baixas temperaturas, na faixa de -184 a 370 °C, sendo o cobre o material positivo e o constantan (liga com cerca de 60% cobre e 40% de níquel) o material negativo. As cores do isolamento para os fios do termopar tipo T, segundo o padrão ANSI MC96.1 1975 (Temperature measurement thermocouples) é azul para o fio positivo e vermelho para o fio negativo (ANSI, 1975).

O limite de temperatura superior de uso para o termopar tipo T varia conforme o diâmetro do fio usado, sendo os valores recomendados apresentados na Tabela 3.1.

Diâmetro, mm e (AWG)	Temperatura máxima, °C
1,63 (14)	370
0,81 (20)	260
0,51 (24)	200
0,33 (28)	200

Tabela 3.1: Limite de temperatura versus diâmetro do fio para o termopar tipo T.

3.6.2. Erro do termopar tipo T

Segundo a norma ANSI-MC96.1-1975, o limite de erro para o termopar tipo T, com a junção de referência a 0 °C, e com uma variação de temperatura de 0 a 350 °C é de ± 1 °C ou $\pm 0,75\%$ (o que for maior) para um termopar padrão, e de $\pm 0,5$ °C ou $\pm 0,4\%$ (o que for maior) para um termopar com especificações de construção mais rigorosas.

3.6.3. Condições de medida

É necessário garantir que a junção de medição esteja numa condição isotérmica com o objeto que se quer medir a temperatura, daí a importância de imergir o termopar a uma profundidade adequada (grosseiramente entre 10 e 20 vezes seu diâmetro externo – incluindo as

proteções). Devido a alta condutibilidade térmica dos terminais do termopar, estes podem sofrer influência da temperatura ambiente, produzindo erros devido a alteração da temperatura na junção de medida. O uso de fios finos na construção do termopar minimiza este problema; porém, o torna mais frágil.

3.6.4. Fabricação de elementos termopares

Os cuidados que se deve ter na confecção dos termopares são basicamente dois: a escolha dos fios e a junção destes.

Os fios devem ser seleccionados de pares casados, testados conforme os limites de calibrações especificados, com diâmetros padrões e o par deve ser adquirido de um único fornecedor.

A junção dos fios de diferentes materiais deve ser feita de forma a se obter uma boa condutividade elétrica e térmica, sem destruir as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos fios do termopar nesta junção. Para uso abaixo de 500 °C os fios podem ser soldados com prata usando bórax como fluxo. No caso deste trabalho, onde as temperaturas a serem medidas estão abaixo de 50 °C, foi usado solda de chumbo-estanho com fluxo de resina.

A preparação dos fios deve ser feita com cuidado para se evitar excesso torção, alongamentos ou esmagamento dos fios pois o esforço mecânico a frio pode alterar a FEM de saída do termopar. Os fios devem ser cortados no comprimento desejado com uma folga para permitir uma ou duas tentativas de solda e para que seja dado o formato desejado na junção. Os fios devem ser limpos com cuidado com um solvente, como álcool isopropílico, antes da soldagem.

Recomenda-se a aplicação de uma fina camada de verniz na junção protegendo-a contra a umidade e evitando a sua oxidação.

3.6.5. Características termoeletricas do termopar tipo T cobre-constantan

Na norma ANSI MC96.1 1975 tem-se disponível uma tabela de valores de temperatura versus tensão termoeletrica para o termopar tipo T, com o valor de temperatura da junção de

referência em 0 °C. Com os dados desta tabela foi traçado o gráfico da Figura 3.4 e calculado o polinômio do terceiro grau que mais se aproxima dos valores desta tabela, na faixa de 0 a 400 °C.

$$Y = 0,0073 x^3 - 0,4216 x^2 + 24,762 x + 0,8958 \quad (3.3)$$

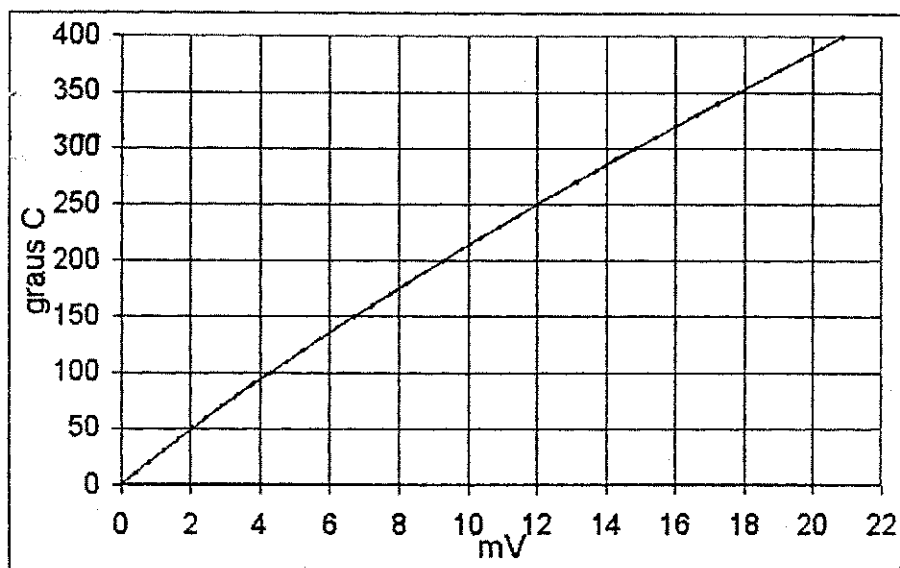


Figura 3.4: Gráfico temperatura versus milivoltagem do termopar tipo T com a junção de referência em 0 °C, obtido de tabela da norma ANSI MC96.1, 1975, na faixa de 0 a 400 °C.

Sendo x a tensão termoelétrica absoluta, dada em milivolts, e Y a diferença de temperatura entre a junção de medida e a junção de referência a zero grau centígrado.

Caso a junção de referência esteja entre 0 °C e 50 °C, é usada outra tabela da mesma norma, para se fazer a correção. Na Figura 3.5 foi traçado o gráfico relativo a esta tabela, sendo o polinômio de segundo grau que se aproxima deste gráfico:

$$Y = -0,6198 x^2 + 25,828 x - 0,0041 \quad (3.4)$$

sendo x a tensão termoelétrica absoluta, dada em milivolts, e Y a temperatura da junção de referência. Neste caso, a tensão gerada pelo termopar é subtraída da tensão gerada pela junção de referência (sendo conhecido a temperatura de referência) e então determinada a temperatura na junção de medida.

3.6.6. Coeficiente de Seebeck do termopar tipo T

O coeficiente de Seebeck, que é um fator linear, que relaciona a tensão termoelétrica gerada pelo termopar com a temperatura na junção de medida, depende da temperatura em que se encontra a junção de referência e se limita a medidas de pequenas diferenças de temperaturas (máximo de 10 °C) entre as duas junções.

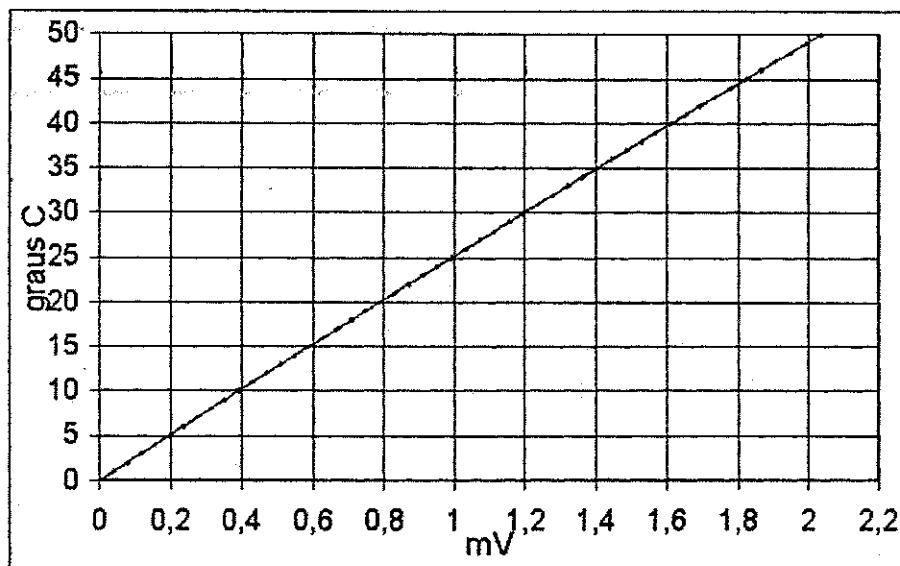


Figura 3.5: Gráfico temperatura versus milivoltagem do termopar tipo T usado para fazer a compensação, quando a junção de referência está com algum valor entre 0 e 50 °C, obtido de tabela da norma ANSI MC96.1 1975.

A Tabela 3.2 apresenta o resultado do cálculo do coeficiente de Seebeck para o termopar tipo T, para diversas temperaturas de referência, variando entre 0 e 50 °C, e foi determinada com os valores das tabelas da norma ANSI MC96.1 1975.

°C	Termopar tipo T Coeficiente de Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
0	38,7
5	39,0
10	39,5
15	39,8
20	40,3
25	40,7
30	41,2
35	41,5
40	42,0
45	42,5
50	42,8

Tabela 3.2: Coeficiente de Seebeck para o termopar tipo T em função da temperatura da junção de referência, obtida a partir das tabelas da norma ANSI MC96.1 1975

A Tabela 3.2 pode ser representada pelo gráfico da Figura 3.6, ou ainda pela equação da reta que mais se aproxima dos pontos deste gráfico:

$$Y = 0,0842 x + 38,623 \quad (3.5)$$

onde x é a temperatura na junção de referência ($^\circ\text{C}$) e Y o coeficiente de Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) do termopar tipo T.

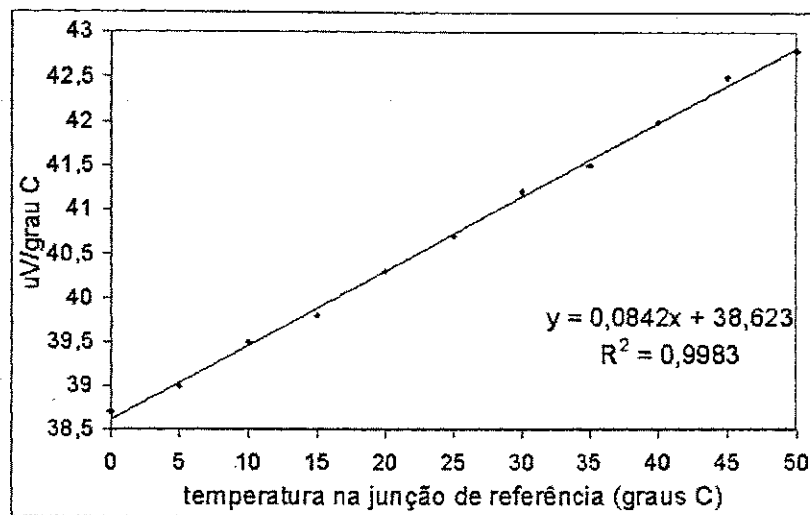


Figura 3.6: Coeficiente de Seebeck para o termopar tipo T em função da temperatura da junção de referência na faixa de 0 a 50 °C.

A seguir veremos a solução específica do projeto e montagem do protótipo de medidor de fluxo de seiva...

4. Projeto e construção do protótipo do medidor de fluxo de seiva (MFS)

4.1. Introdução

Partindo-se da escolha do método de medida foram feitas algumas premissas que deram a orientação do projeto e implementação do protótipo: 1) O circuito de coleta e armazenamento de dados, dedicado a uma sonda, formando um conjunto único de medidor de fluxo de seiva (MFS); 2) Portabilidade do instrumento, sendo possível ser alimentado por uma fonte de 12 V corrente contínua, com bateria recarregável; 3) Capacidade de coleta e armazenamento de dados de vários meses, até um ano e meio; 4) Baixo custo.

Após uma análise das várias alternativas de implementação do circuito de amplificação, conversão, processamento e armazenamento dos dados, além da transmissão destes para posterior processamento, foram selecionados circuitos e componentes necessários à implementação do protótipo.

Mostra-se na Figura 4.1 um diagrama em blocos do MFS, que tem um bloco de teclados e um painel indicador para se fazer as leituras dos sinais em tempo real e verificação do funcionamento do módulo. A interface das entradas analógicas foi feita para compatibilizar os níveis de tensão do sinal dos termopares com o nível de tensão das entradas analógicas do ADuC812. A fonte de alimentação foi feita de tal forma que é possível alimentar o circuito a partir de uma bateria recarregável de 12V, isto possibilita que o medidor de fluxo de seiva funcione usando uma fonte de painel solar, permitindo que as medidas sejam feitas no campo agrícola sem necessidade de rede de energia elétrica comercial. Os demais blocos são necessários ao funcionamento do medidor e alguns foram usados nas etapas de teste, como o módulo do sistema de medida de fluxo volumétrico, que não é usado no funcionamento normal do medidor.

A seguir são detalhadas as funções e formas de implementação de cada bloco mostrado no diagrama da Figura 4.1. Na implementação do protótipo do MFS, existe alguma correspondência entre os blocos da Figura 4.1 com as placas de circuito impresso construídas, sendo que cada

placa contém um ou mais blocos funcionais do diagrama. Os leiautes destas placas são apresentadas no Apêndice B.

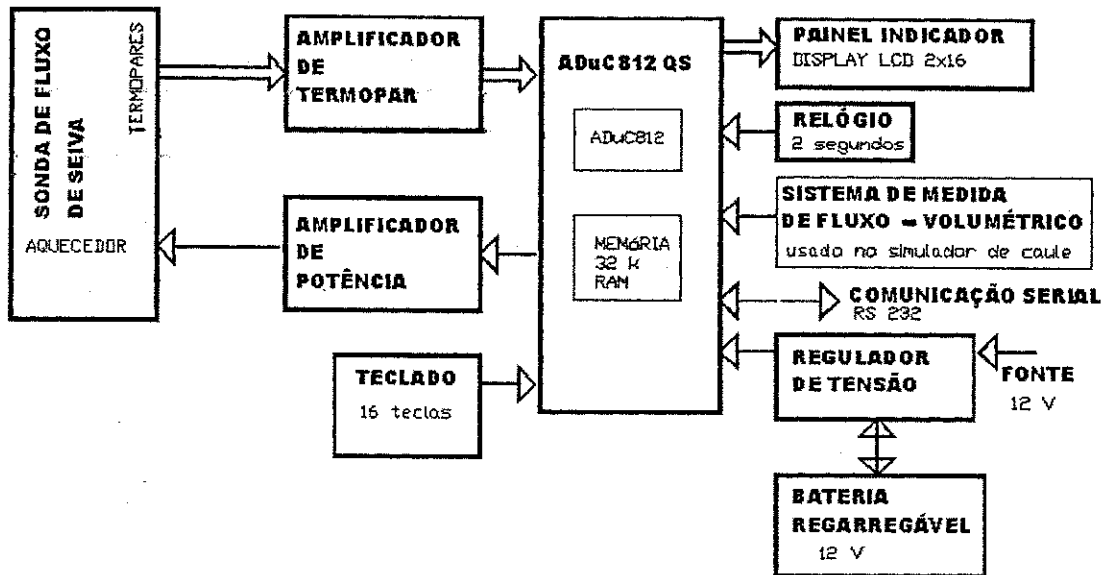


Figura 4.1: Diagrama de blocos do medidor de fluxo de seiva, incluindo a sonda de fluxo de seiva

4.2. Módulo de controle, coleta e armazenamento dos sinais analógicos ADuC812QS

Para o desenvolvimento do protótipo foi escolhida uma placa de desenvolvimento e avaliação da Analog Device ADuC812QS, que já inclui: um microconversor @ ADuC812; um regulador de tensão de 5V; interface serial RS232, memória de 32K bytes e outros componentes necessários ao funcionamento do microcontrolador. Esta placa foi usada sem nenhuma modificação, sendo apenas montados periféricos que foram conectados a esta.

O microcontrolador ADuC812 é um circuito integrado da Analog Device, que incorpora um núcleo do microcontrolador 8051, um conversor analógico-digital de 12 bits, um multiplexador analógico de 8 entradas, dois conversores digital-analógicos de 12 bits e contadores-temporizadores de 16 bits.

4.3. Amplificador de termopar

Como a entrada do conversor A/D do ADuC812 está configurada para aceitar tensões variando entre 0 e 2,5V e a tensão de saída do termopar varia entre $-0,8\text{mV}$ e $+0,8\text{mV}$ na faixa de temperatura de trabalho de -20°C e $+20^\circ\text{C}$, é necessário o estágio amplificador e de compensação de nível cc entre o sensor e o conversor A/D, para que a variação do nível do sinal ocupe toda a faixa de variação de entrada do conversor A/D. Com isso se reduz as perdas de resolução e de faixa de medição. Para se obter o máximo desempenho do circuito, a compensação de nível cc deve ser de 1,25V (metade da faixa de variação da entrada do conversor A/D) e o ganho deve ser de 1500, aproximadamente.

O amplificador de instrumentação utilizado no protótipo foi o INA114 (U1 na Figura 4.2) da Burr-Brown (Texas Instruments). Este circuito integrado possui uma arquitetura de amplificador de instrumentação, usando três amplificadores operacionais, é ajustado a laser para se ter uma baixa tensão de offset ($50\mu\text{V}$), uma baixa variação com a temperatura ($0,25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) e uma alta rejeição ao modo comum (115dB com $A_{VG} = 1000$). Ele opera com uma fonte única de 5V e possui uma corrente quiescente de no máximo 3mA. O ganho de tensão (A_{VG}) do INA114 é ajustado conectando um único resistor externo, R_G :

$$A_{VG} = 1 + \frac{50\text{ k}\Omega}{R_G} \quad (4.1)$$

Foi usado um resistor de filme metálico de 100Ω em R_G , obtendo-se um ganho de tensão para este amplificador de aproximadamente 500 (ver Figura 4.2).

A tensão de referência de 2,5V gerada pelo ADuC812 passa por um buffer OP491 (U2c na Figura 4.2) e por um divisor de tensão ajustável gerando um nível de 1,25V, esta tensão passa por outro buffer OP491 (U2b na Figura 4.2) que gera uma tensão de 1,25V com baixa impedância, que alimenta a porta de referência de saída do INA114 (pino 5). Desta forma, a tensão de saída do amplificador de termopar fica referenciada à tensão de 1,25V, no meio da escala da entrada do conversor A/D, que varia de 0 a 2,5V, sendo assim possível medir valores positivos ou negativos na entrada do amplificador de termopar.

No estágio de saída foi usado um amplificador operacional OP491 (U2a na Figura 4.2) da Analog Devices ligado como amplificador inversor com ganho aproximado de 3,07. Desta forma a sua saída pode variar para mais 1,25V e menos 1,25V, dentro da faixa de 0 a 2,5V, requerendo para isso que a saída do INA114 varie para mais e para menos 0,41V. Com estes níveis de tensão de saída do INA114 garante-se uma alta linearidade deste estágio para sinais de entrada variando de +0,8mV a -0,8mV.

Na Figura 4.2 estão indicadas as variações máximas dos sinais, nas várias etapas do amplificador de termopar. Considerando uma variação de 40 °C na entrada, a resolução conseguida na saída do conversor A/D de 12 bits é de 0,01 °C. A calibração deste estágio é visto no item 6.2.

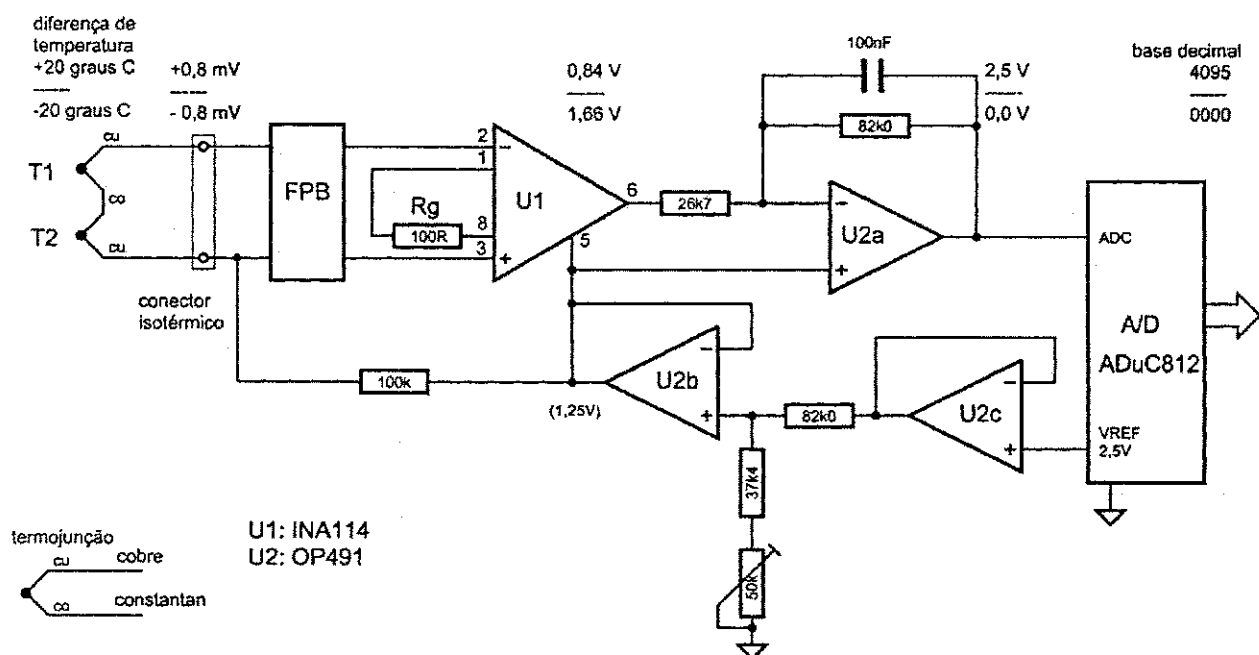


Figura 4.2: Configuração do amplificador de termopar mostrando a faixa de variação máxima de sinal nas várias etapas.

Um capacitor em paralelo com o resistor de realimentação do segundo estágio é usado para limitar a banda de passagem para as frequências de interesse (menor que 1Hz).

4.4. Amplificador de potência

Este amplificador foi construído para permitir que a saída analógica do ADuC812 (que pode ser ajustada por programa entre 0 e 2,5V) possa ser usada para controlar o aquecimento da sonda. Este recurso é usado para gerar uma tensão sobre o aquecedor da sonda, proporcional a tensão de saída do conversor D/A do ADuC812. O diagrama esquemático do amplificador é apresentado na Figura 4.3 e o ganho de tensão aproximado é de 3 vezes a tensão de entrada. Um potenciômetro de ajuste permite alterar o ganho de forma que a saída varie linearmente com a entrada, com um mínimo de saturação no valor máximo. Este valor foi determinado experimentalmente em 7,516 V. Esta solução não é adequada para se evitar erros de queda de tensão no cabo que alimenta o aquecedor da sonda. Porém como esta é uma proposta de um sistema de aquisição e controle dedicado, e as dimensões do cabo são fixas, a calibração do ganho foi feita incluindo a queda de tensão neste cabo.

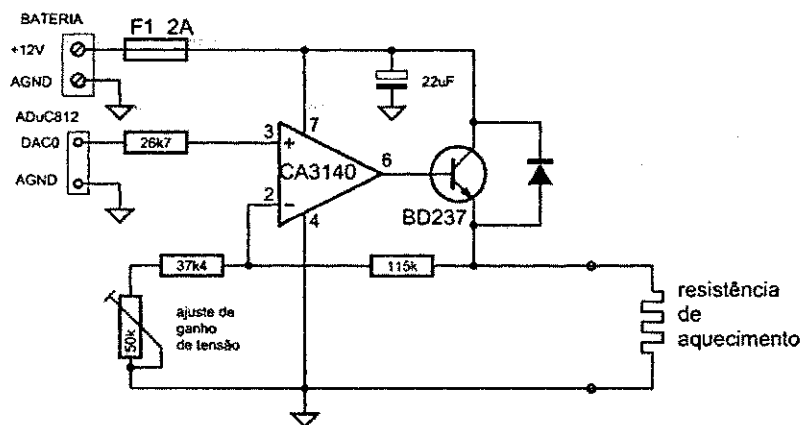


Figura 4.3: Diagrama esquemático do amplificador de potência.

Para se verificar o desempenho do amplificador de potência, incluindo: variação de tensão, linearidade e ganho, foram realizados testes no laboratório com um multímetro de precisão Agilent 34401A de 6 e ½ dígitos e uma fonte de alimentação corrente contínua Agilent E3631A 0-6V, 5A / 0-±25V, 1A. Os sinais de entrada foram gerados na placa ADuC812 com o programa de controle do medidor, pelas teclas [0] a [9] e a tensão de saída foi medida sobre a resistência de aquecimento da sonda. Os resultados obtidos desta calibração estão dispostos na Tabela 4.1.

Tecla	Saída analógica no ADuC812 (V)	Tensão no aquecedor (V)
0	0,0000	0,007
1	0,2778	0,789
2	0,5555	1,630
3	0,8333	2,473
4	1,111	3,313
5	1,389	4,155
6	1,667	4,995
7	1,944	5,836
8	2,222	6,677
9	2,500	7,516

Tabela 4.1: Resultado da calibração do amplificador de potência, com valores obtidos sobre a resistência de aquecimento da sonda.

Para se verificar a regulação do amplificador, foi provocado uma variação de tensão de alimentação do protótipo de MFS, com valores entre a tensão a plena carga (13,2V) e a tensão de descarga da bateria (10,5V), ou seja, uma variação de 20% na fonte de alimentação do circuito. Isto corresponde a uma variação na tensão entregue no aquecedor de apenas 0,02%, para uma tensão no meio da faixa de variação de saída, ou seja, este amplificador é pouco influenciado pela variação da tensão do conjunto da fonte de alimentação e da bateria de 12V.

4.5. Teclado

O teclado faz parte da interface homem máquina neste protótipo de MFS, permitindo a entrada manual de comandos para iniciar as diversas tarefas programadas no controlador.

Devido à impossibilidade de se fazer uma expansão no decodificador de endereços da placa de desenvolvimento ADuC812QS sem modificá-la, ou de se usar as portas de entrada e saída digitais do microcontrolador, pois estas portas já são usadas na comunicação serial e interrupções externas, optou-se pelo uso de uma entrada analógica para ler o teclado. O diagrama esquemático do circuito do teclado é apresentado na Figura 4.4 e os resistores usados para gerar os diversos níveis de tensão, relativo a cada tecla, são resistores de valores padrões disponíveis comercialmente de 5% de tolerância. O programa decodificador que identifica a tecla pressionada

a partir do valor analógico lido na entrada ADC0, foi facilmente implementado, bastando fazer uma aproximação do valor de 12 bits para um valor de 4 bits. Isto é conseguido com uma soma com 7Fh, para fazer o arredondamento e separando-se os quatro bits superiores do valor de 12 bits. Devido a faixa de tolerância de tensão para cada tecla ser de aproximadamente 0,15 V, pode-se usar os resistores de 5% de tolerância para gerar os 16 níveis de tensão necessários para identificar as teclas, além do valor máximo (2,5V) para identificar que nenhuma tecla foi pressionada.

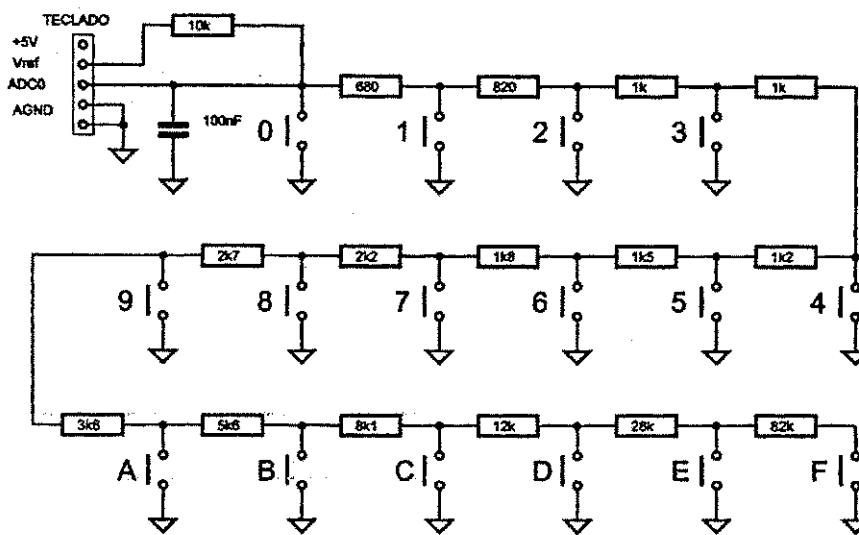


Figura 4.4: Diagrama esquemático do teclado.

4.6. Painel indicador

O painel indicador também faz parte da interface homem máquina. Nesta implementação do protótipo de MFS, sua função foi de indicar os valores adquiridos, permitindo verificar o funcionamento do MFS e realizar sua calibração manual.

O painel indicador usa um módulo display de cristal líquido padrão de 2 linhas com 16 caracteres, cada. Este módulo usa um controlador que segue o padrão do controlador de display Hitachi HD44780. Nesta aplicação específica, só é usado o modo de escrita no display, não permitindo uma transferência rápida de dados, como é obtido quando se usa o modo de escrita e leitura do display. Desta forma, o programa que transmite dados para o display deve fornecer

retardos de tempo apropriados entre informações e entre comandos para permitir que o controlador do display tenha o tempo suficiente para estar pronto para receber a próxima informação ou comando, quando esta chegar. Utilizou-se a comunicação paralela de 8 bits no barramento de dados do microcontrolador, com o endereçamento de saída do microcontrolador, mapeado em memória, nos endereços 8002h para dados e 8000h para comandos do display. O circuito decodificador de acionamento do display é apresentado na Figura 4.5.

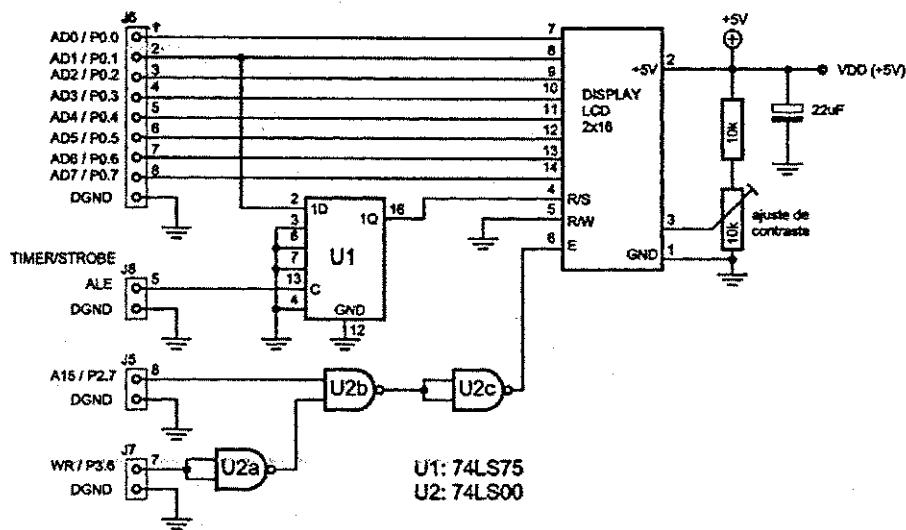


Figura 4.5: Diagrama esquemático do circuito de acionamento do painel indicador.

4.7. Relógio de 2 segundos

Sendo uma das funções do MFS registrar os valores lidos ao longo do tempo, é imprescindível uma base de tempo adequada para controlar a regularidade das medidas e o respectivo registro na memória de dados.

A base de tempo usada para fazer o sincronismo dos registros com o tempo é gerada em um circuito de relógio controlado com cristal de quartzo. O período de 2 segundos foi o valor mais adequado encontrado para esta aplicação, que exige longos tempos de registro, da ordem de dias, meses ou até anos.

A determinação dos períodos exatos para se realizar as tarefas de aquisições, acumulação e de registro dos valores na memória, é realizado no programa de controle, com a acumulação dos períodos de relógio. O número de acumulações depende de cada aplicação e neste protótipo este valor é fixo com seu valor determinado no programa de controle e aquisição de dados.

O sinal de relógio é ligado na entrada INT1 / P3.3 do microcontrolador, para gerar a interrupção externa que inicia a rotina de aquisição de dados, quando esta estiver habilitada.

4.8. Regulador de tensão da fonte de energia

Sendo este protótipo de MFS destinado a medir valores no campo agrícola, e seu consumo de energia muito baixo (3,6W), é possível alimentá-lo com uma fonte de energia solar. Para isso foi construído um regulador para painel solar que inclui o controle de descarga de bateria para aumentar a vida útil desta.

Todo o circuito é alimentado com 12 V \pm 10%, 0,3 A. Com estas características pode-se usar um painel solar e uma bateria recarregável de 12 V devidamente dimensionados para as características de insolação do local ou ainda uma fonte convencional de 12 V com bateria para evitar a perda dos dados registrados, no caso de falta de energia comercial. O circuito regulador de tensão, cujo diagrama esquemático é apresentado na Figura 4.6, é usado para evitar sobrecarga ou impedir a descarga total da bateria chumbo-ácida, prolongando desta forma sua vida útil. Este circuito possui um comparador de tensão que monitora a tensão da bateria. Caso esta tensão atinja o limite superior de carga, a entrada do painel solar é desligada, evitando a sobrecarga desta. Para evitar a descarga da bateria, além do limite inferior permitido, o circuito possui dois comparadores que controlam a saída do regulador. Caso a tensão atinja o limite inferior de descarga, a saída é desligada e só volta a ligar se a bateria atingir a tensão de plena carga.

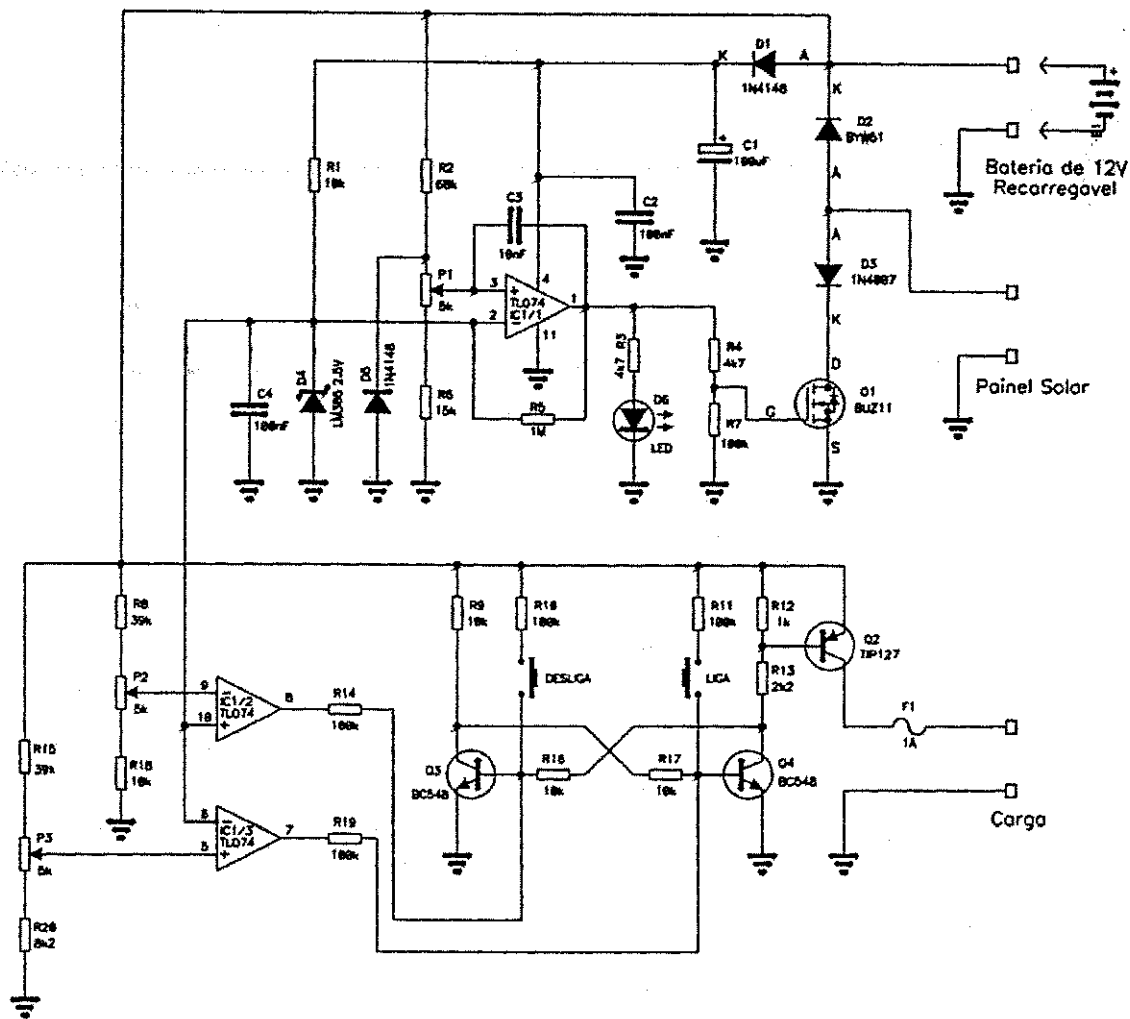


Figura 4.6: Diagrama esquemático do regulador da fonte de energia.

4.9. Módulo da sonda de fluxo de seiva

Neste módulo ocorre o balanço de calor com aquecimento constante. A sonda é colocada em volta do caule como uma jaqueta. Assim, o aquecedor é devidamente alimentado e dos termopares são retiradas as informações necessárias aos cálculos do fluxo de seiva da planta. Esta sonda foi construída especificamente para um caule de 20 mm de diâmetro. O cabo que interliga esta sonda ao sistema de controle e aquisição de dados é soldado nesta e a outra extremidade é ligada a um conector, fazendo parte integrante da sonda.

Neste protótipo foi implementada a configuração de ligação proposta por STEINBERG et al. (1990), que tem os sinais de tensão gerados pelos termopares (A e B) com um ponto comum de referência (ponto H na Figura 4.7). Nesta configuração a distância entre as junções é maior, e os níveis de tensão gerados pelos termopares são superiores aos gerados pela sonda proposta por SAKURATANI (1981).

Adicionalmente, foi implementada neste protótipo a modificação que OLIVEIRA & SILVA (2000) propuseram e testaram com sucesso. Esta modificação consiste em termopares ligados em série para gerar os sinais A e B, conforme pode ser visto na Figura 4.7. Com isso a tensão gerada pela sonda é multiplicada pelo número de elementos ligados em série, melhorando o nível de sinal. Além disso, como as junções são dispostas ao longo do perímetro do caule, se tem um valor médio mais representativo do fluxo de calor neste, permitindo compensar eventuais não uniformidades na distribuição da seiva ao longo da área da secção transversal do caule.

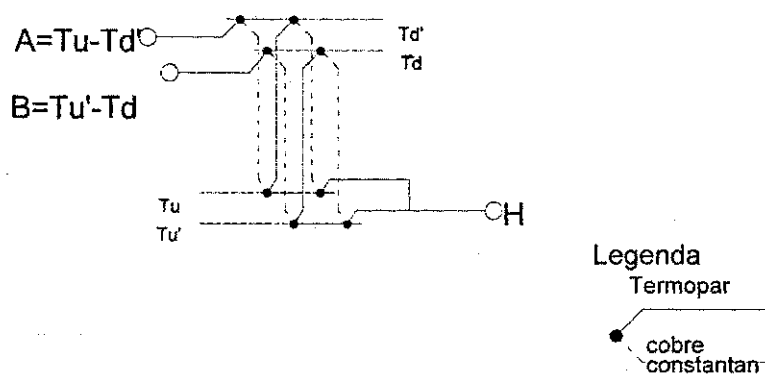


Figura 4.7: Diagrama de ligação dos termopares proposto por OLIVEIRA & SILVA (2000).

Como uma grande vantagem desta sonda é ser não intrusiva, para não prejudicar o vegetal e criar zonas de descontinuidades no interior do caule, os termopares foram construídos com seus terminais em sentidos opostos em relação a junção., mantendo-se 8mm de comprimento (com a junção no centro) de contato com o caule. No caso das junções A e B que medem as temperaturas geradas pelos fluxos de calor verticais, este contato foi feito ao longo do perímetro do caule, de forma a se ter um contato térmico com a linha isotérmica gerada por este fluxo. Desta forma, o

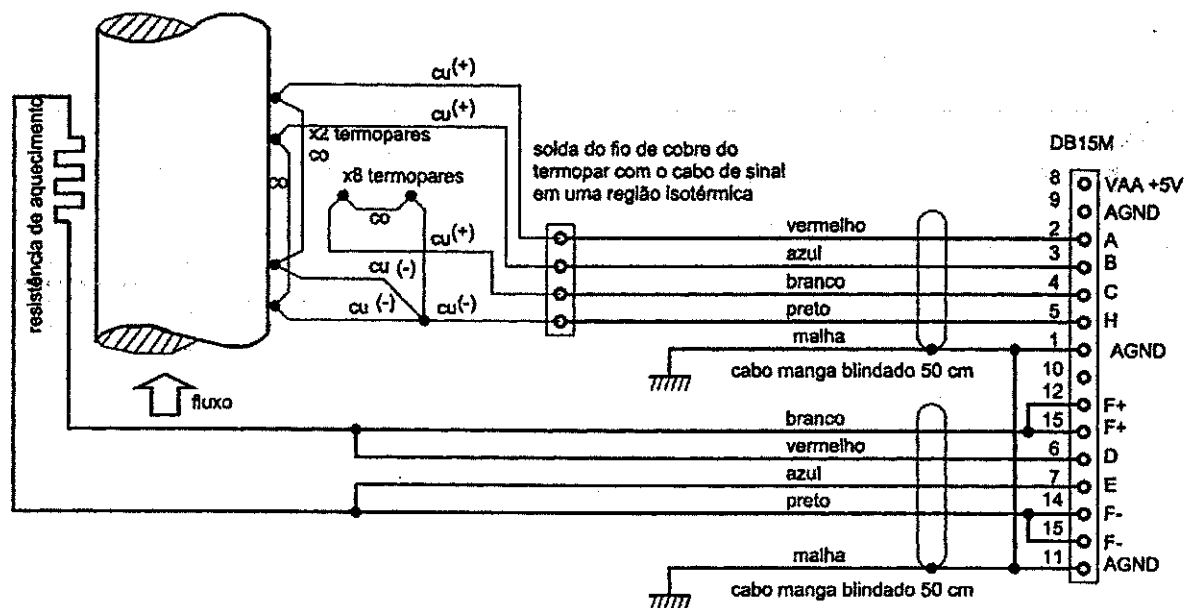


Figura 4.9: Esquema de ligação dos termopares e aquecedor no conector que liga a sonda ao módulo de controle e aquisição de dados (na figura co representa o fio de constantan e cu o fio de cobre do termopar).

Na instalação da sonda no caule da planta foi usada pasta térmica IMPLASTIC® (Votorantim / SP) para melhorar o contato térmico das junções e aquecedor com o caule, preenchendo as imperfeições e rugosidade natural da superfície do caule.

O aquecedor foi fornecido por Fantech Corp. Cerritos CA 90701, USA e consiste de um filme de Kapton® (Du Pont) com uma liga de Inconel depositada em forma de trilhas. As dimensões são de 73 mm x 21 mm com o valor de resistência de $53,787\Omega$ a 27°C . Esta resistência é fixada entre o medidor de fluxo de calor radial (termopilha) e o caule. A variação de resistência do aquecedor, com a temperatura, foi medida em laboratório usando um termômetro de banho e com a sonda fixada em um cilindro de madeira no lugar do caule. Os resultados das medidas são apresentados na Tabela 4.2. A variação de resistência observada é muito pequena, podendo ser considerada constante nos cálculos do fluxo de seiva.

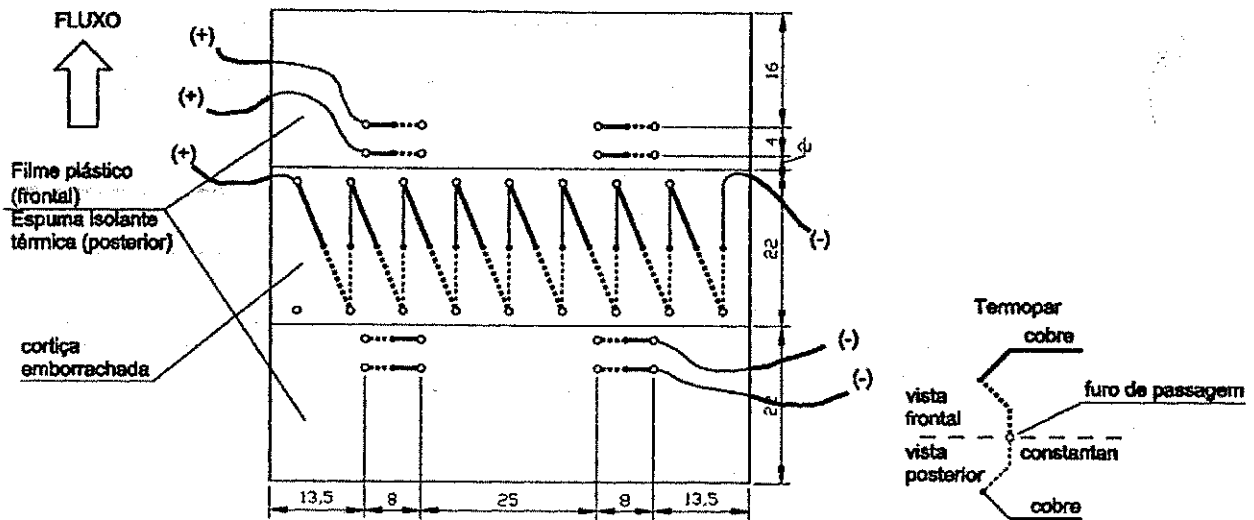


Figura 4.8: Vista interna da montagem (não são mostradas as ligações posteriores dos termopares de fluxo vertical para não confundir com o circuito da termopilha).

As ligações dos fios de cobre dos termopares, com o cabo que interliga a sonda aos amplificadores de termopar estão apresentados na Figura 4.9. Observe-se que a polaridade indicada para os fios de cobre esta relacionada ao sentido do fluxo de calor, ou seja, o fio de cobre da junção mais quente do termopar é o positivo. No caso da termopilha, o fio de cobre considerado positivo é o que está ligado à junção interna do medidor de fluxo de calor radial (que está na região mais quente). A malha do cabo “manga” blindado deve ser ligada na blindagem de alumínio da sonda, para evitar a interferência de ruídos eletromagnéticos.

Resistência (Ω)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
53,837	47
53,797	39
53,741	32
53,713	28
53,787	27

Tabela 4.2: Variação da resistência do aquecedor com a temperatura.

No esquema da Figura 4.9, o cabo que liga o aquecedor ao conector é de dois condutores, sendo um para conduzir corrente e o outro para medir a tensão sobre o resistor, evitando desta forma que a queda de tensão no cabo interfira nesta medida. Este tipo de ligação foi feito para ficar de acordo com a sonda usada na UFPB. Porém, como apresentada no item 4.4, a calibração do amplificador de potência foi feita medindo-se a tensão sobre o resistor de aquecimento, independentemente da queda de tensão no cabo e, como neste protótipo não se prevê a troca do cabo, considera-se a resistência do cabo constante.

4.10. Fonte de tensão de microvolts

Esta fonte de níveis de tensão da ordem de microvolts é usada para a calibração do sistema composto pelo amplificador de termopar, multiplexador e conversor A/D. Desta forma o MFS pode ser calibrado no campo antes do início de uma nova coleta de dados. Neste processo são verificados o ganho e o deslocamento de nível de tensão cc, usados para o processamento dos dados obtidos.

A fonte de tensão de microvolts usada como padrão de calibração secundário, foi construída com um circuito integrado REF200 da Burr-Brown e uma rede de resistores de valor fixo. Esta fonte permite gerar 19 valores fixos de tensão na faixa de 0 a $970\mu\text{V}$ (com a chave CH1 na posição x1) e seu diagrama esquemático é mostrado na Figura 4.10. Esta gama de valores permite fazer os testes dos amplificadores de termopar, determinando o ganho, os pontos de saturação e a linearidade do circuito, dentro dos limites da faixa de valores de tensão de entrada, como pode ser visto no item 6.2.

Como foram usados resistores fixos (e de valor não muito precisos) a calibração desta fonte de tensão de microvolts consistiu na medida dos valores de tensão gerados, criando-se uma tabela de valores considerados como um padrão de calibração secundário, estes valores são apresentados na Tabela 4.3.

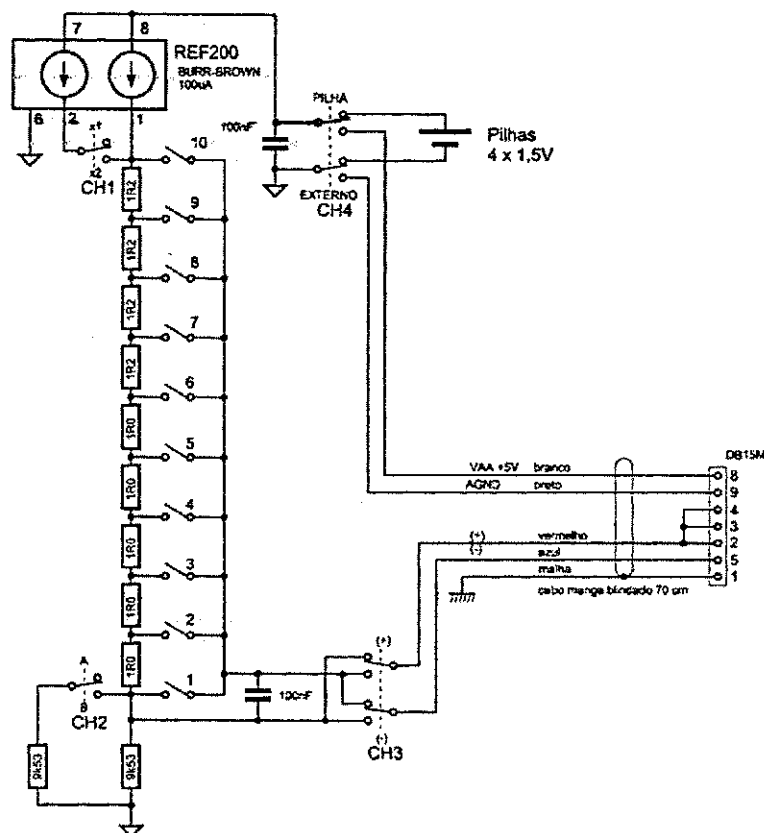


Figura 4.10 : Diagrama esquemático da fonte de tensão de microvolts.

Estas medidas foram feitas no laboratório (LIEC), usando um multímetro digital Agilent 34401A de 6 ½ dígitos. Foram feitas 4 medidas para cada valor e registrado a média.

Tensão de saída da fonte em microvolts (escala x1)										
posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(+)	-1,2	98,5	197,5	297,8	394,5	494,8	612,5	730,4	848,0	968,2
(-)	-1,2	-100,5	-199,9	-298,0	-395,5	-495,3	-613,2	-731,0	-849,0	-966,6

Tabela 4.3: Resultado da calibração da fonte de tensão de microvolts, usando um multímetro digital Agilent 34401A de 6 ½ dígitos

4.11. Programa de controle de aquisição de dados e interface homem máquina

Este programa gerencia as tarefas de aquisição de dados, foi escrito em linguagem de máquina (assembly) do 8051, fica residente na memória de programa do ADuC812 e inicia seu funcionamento imediatamente ao se ligar o microconversor. Ao ser acionada uma tecla, o programa executa as funções pré-definidas de cada tecla. Também apresenta informações no display e no LED na placa de desenvolvimento ligado na porta P3.4 do microconversor (LED P3.4). Na Figura 4.11 é apresentado o fluxograma do programa de controle de aquisição de dados. No Apêndice C, é apresentado a listagem completa do programa fonte.

A interface homem máquina é composta de um teclado e um display de cristal líquido. As 16 teclas são identificadas com números de [0] a [9] e das letras de [A] a [F]. O display alfanumérico de cristal líquido de 2 linhas de 16 caracteres cada é utilizado para apresentar os valores das entradas analógicas.

As operações necessárias ao funcionamento do medidor de fluxo de seiva são selecionadas nas teclas e realizadas imediatamente ao toque da respectiva tecla. Da forma que o programa de controle foi realizado neste protótipo, o operador tem responsabilidade total pelo bom funcionamento deste, sendo que qualquer toque não intencional pode causar, por exemplo, a perda dos dados contidos na memória, se a tecla [C] for pressionada após o período de coleta de dados. Apesar de não conter funções de confirmação de comandos, o protótipo funcionou perfeitamente bem na aquisição e transferência de dados coletados, tanto do simulador de caule quanto nas medidas de campo.

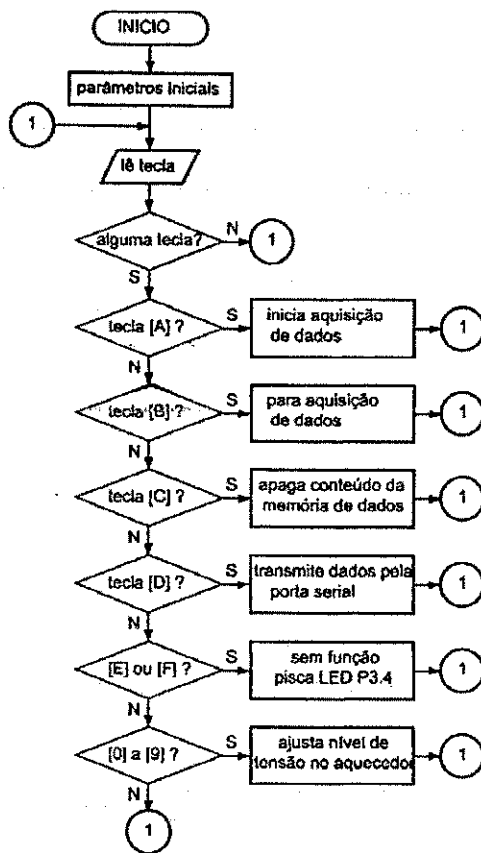


Figura 4.11: Fluxograma do programa principal de controle de coleta de dados.

As funções de comandos implementadas no protótipo são:

1. A tecla [A] dá início a aquisição de dados, que se faz pela habilitação da interrupção externa INT1. Os parâmetros de intervalo de tempo entre leituras e número de leituras que serão acumuladas para se calcular a média para registro, são definidas no programa, e não podem ser mudadas pelo teclado. O registro dos dados na memória sempre inicia pelo endereço mais baixo da memória, se sobrepondo aos dados anteriores registrados, se houverem. A interrupção externa INT1 ocorre a intervalos de 2 segundos. Esta interrupção dá início à rotina de aquisição que faz o controle do intervalo de tempo em que se deve fazer as leituras dos canais analógicos e o número de acumulações que se deve fazer para tirar a média das leituras. A rotina de atendimento à interrupção também faz o registro dos valores acumulados na memória e apresenta os valores lidos no display. Todos estes procedimentos devem ser realizados em menos de 2 segundos.

2. A tecla [B] para a aquisição de dados (inibe interrupção externa INT1). Esta função permite parar o processo de coleta de dados antes que a memória de dados seja totalmente preenchida. Caso não seja usada esta função, a coleta de dados continua até que a memória seja totalmente usada. Neste instante, o processo de coleta de dados para; em ambas condições de parada de coleta de dados, o programa registra o último endereço de memória usada para servir de controle na análise dos dados e o programa principal fica aguardando o próximo comando. Os dados ficam retidos na memória indefinidamente, enquanto o equipamento ficar ligado. Como esta memória é do tipo volátil, ou seja, perde seu conteúdo se for desligada, os dados devem ser primeiramente transmitidos para um microcomputador antes de ser desligado.

3. A tecla [C] apaga o conteúdo da memória de dados. Esta função permite que a memória de dados tenha seu conteúdo zerado antes do início da coleta de dados; isto permite uma melhor clareza nos dados obtidos, impedindo que os dados de uma coleta anterior se confundam com os dados de uma coleta atual, quando esta é interrompida antes do preenchimento total da memória. Mesmo que isso ocorra, é possível determinar o fim dos dados coletados, pelo registro que contém o último endereço de memória usada.

4. A tecla [D] transmite o conteúdo da memória de dados para um microcomputador pela porta serial RS232. A transmissão é feita de todo o conteúdo da memória, independente da quantidade de dados coletados.

5. As teclas [E] e [F] não são usadas neste protótipo; porém, foi feita uma pequena função de piscar o LED ligado na porta de saída P3.4 da placa de desenvolvimento do ADuC812 (LED P3.4), ao ser pressionado alguma destas teclas. Esta função não interfere no funcionamento do sistema de coleta de dados e tem apenas o objetivo de verificar o funcionamento do programa, pois como o processo de coleta de dados é muito lento, o piscar desse LED em resposta ao acionamento desta tecla dá um indicativo de funcionamento do sistema.

6. As teclas de [0] a [9] são usadas para ajustar a tensão de saída para o aquecedor da sonda. Esta tensão permanece constante até que uma nova tecla seja pressionada. Os valores de tensão para cada tecla são preestabelecidos no programa, podendo ser vistos na Tabela 4.1. O acionamento de qualquer destas teclas, com a respectiva alteração da tensão no aquecedor, não

interfere no processo de coleta de dados, mesmo se este já tiver sido iniciado. O valor inicial da tensão de saída para o aquecedor é de 50% do valor máximo, caso nenhuma destas teclas sejam pressionadas.

Neste protótipo o display foi utilizado para supervisionar os valores lidos pelas entradas analógicas do microconversor. Esta característica foi imprescindível para fazer a calibração manual do sistema de aquisição de dados composto pelo amplificador de termopar e conversor analógico-digital. Para se apresentar os valores dos canais analógicos no display, foram usados 4 caracteres numéricos para cada canal, com uma notação decimal inteira, variando de 0000 a 4095, correspondendo respectivamente à uma tensão de entrada no conversor analógico-digital indo de 0,000 a 2,500 V.

O formato da tela de cristal líquido é o seguinte: Na linha 1, os quatro primeiros algarismos apresentam a contagem de gotas no período de registro de dados, os quatro algarismos seguintes apresentam o valor do canal analógico 1, os quatro algarismos seguintes apresentam o valor do canal analógico 2, e os quatro últimos algarismos desta linha apresentam o valor do canal analógico 3. Na linha 2, os quatro primeiros algarismos apresentam o valor do canal analógico 4, os quatro algarismos seguintes apresentam o valor do canal analógico 5, e assim sucessivamente até completar os 16 algarismos desta linha. Uma marca no plástico que protege o display faz a separação dos algarismos para facilitar a leitura.

4.11.1. Valores registrados e comunicação serial

Os valores registrados correspondem aos canais A e B, que determinam os fluxos de calor no sentido axial, o canal C da termopilha, que determina o fluxo de calor no sentido radial, um canal contendo a informação de temperatura do microconversor [®] ADuC812 e um canal contendo o valor que o microcontrolador envia para o conversor digital/analógico que é responsável pela tensão aplicada ao resistor de aquecimento. Todos estes valores são de precisão de 12 bits.

Durante o processo de transferência de dados para o microcomputador, os valores da memória de dados do microconversor (dois bytes) são convertidos para decimal inteiro com 6

algarismos e os caracteres ASCII, que representam cada algarismo, são transmitidos de forma serial pela porta RS232, um caracter espaço separa cada valor e no final de uma linha é enviado um par de caracteres CR e LF. Esta matriz de dados é de tamanho constante, com 2047 linhas por 9 colunas, sendo que cada dado desta matriz está no formato decimal inteiro com 6 algarismos, como descrito anteriormente. Os valores dos dados são descritos a seguir, utilizando-se o seguinte exemplo:

```
000016 000000 000000 022608 000000 000000 000000 000000 000000
000032 000000 007270 008528 010709 016380 016380 007171 004154
000048 000000 007270 008528 010699 016380 016380 007171 004151
...
022560 000000 007326 008574 010714 016380 016380 007172 004116
022576 000000 007326 008574 010718 016380 016380 007172 004116
022592 000000 007326 008572 010709 016380 016380 007171 004117
022608 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
022624 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
022640 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
...
032720 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
032736 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
032752 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
```

Sendo:

A primeira coluna é um seqüencial calculado no instante da transmissão dos dados, indicando o endereço do byte do início de cada linha, e não representa informações contidas na memória. Observe que este seqüencial é incrementado de 16, pois cada registro utiliza 16 bytes.

A primeira linha (seqüencial 000016) contém informações relativas à coleta dos dados, como um cabeçalho, sendo que nesta versão do programa de aquisição de dados, apenas a quarta coluna é usada e contém o número de registros coletados, este valor é adicionado de um e multiplicado por 16. Ou seja, no exemplo acima o valor 022608 deve ser dividido por 16, obtendo-se 1413, que subtraindo 1 resulta no total de 1412 registros válidos.

As demais linhas (numeradas de 000032 a 032752) contém os dados adquiridos, sendo descrito a seguir o conteúdo de cada coluna:

A coluna 2 é usada para apresentar o número de gotas em cada registro, quando se usa o simulador de caule para se verificar o funcionamento da sonda.

A coluna 3 contém o canal A da sonda *, corresponde a entrada analógica 1.

A coluna 4 contém o canal B da sonda *, corresponde a entrada analógica 2.

A coluna 5 contém o canal C da sonda *, corresponde a entrada analógica 3.

As colunas 6 e 7, correspondem às entradas analógicas 4 e 5 do microconversor ADuC812, que não estão sendo usadas no circuito deste protótipo, sendo que o microconversor lê o valor máximo na sua entrada ou seja 4095 *.

A coluna 8 contém o valor * usado para ajustar a tensão no aquecedor (correspondente ao canal D da sonda proposta por STEINBERG et al. (1990) como descrito no item 2.3).

A coluna 9 corresponde a leitura de temperatura do sensor interno do microconversor *.

* No exemplo acima este valor é multiplicado por 4, pois, neste exemplo, são feitas 4 leituras para cada registro, estas leituras são somadas para se tirar posteriormente a média. Esta observação é válida para as colunas 3 a 9 a partir da segunda linha.

Neste processo de transmissão dos dados da memória, todo o seu conteúdo é transmitido, num total de 32768 bytes (excluindo os 16 primeiros bytes da memória). Observe ainda que os valores de memória que não são utilizados estão preenchidos com zeros, isto só ocorre se, antes do início de uma nova aquisição, for feito o procedimento de apagar o conteúdo da memória de dados (tecla [C]). Este procedimento evita também que ocorram erros de acumulação com valores pré-existent na memória.

A captura dos dados no microcomputador que é ligado na porta serial do sistema de aquisição de dados é feita pelo programa Hyper Terminal ®, que acompanha o sistema

operacional Windows ®, gerando então um arquivo texto com os dados coletados. Dessa forma, os dados coletados podem ser processados por uma série de programas específicos. No caso deste trabalho foi utilizado o Excel ® da Microsoft para fazer este processamento.

4.12. Processamento de dados coletados

Após a leitura dos dados no período de interesse, o procedimento de transferência dos dados na memória iniciada pela tecla [D], transmite os dados devidamente formatados para um computador pela porta serial no qual o programa Hyper Terminal ®, recebe estes dados e gera um arquivo no formato texto conforme descrito anteriormente.

O processamento dos dados obtidos das medidas em uma planta foi feito em uma planilha Microsoft Excel ®. A importação dos dados do arquivo texto é feita sem problema, pois o texto já está em forma de linhas e colunas. Esta importação ocorre na planilha de segundo plano (plan2), de onde são selecionadas apenas as colunas de interesse, no caso, os valores dos canais A, B e C e a temperatura do microcontrolador. Estes valores estão em decimal inteiro e acumulado o número de leituras feitas em cada registro.

Obs. Para efeito de descrição das equações de processamento da planilha, a seguir, estes valores são designados por CA, CB, CC e TuC, respectivamente.

Nas primeiras 28 linhas das primeiras 7 colunas da planilha, foram colocados os parâmetros relativos aos registros coletados conforme pode ser visto na Tabela 4.4.

planta2b.xls início 12/04/2002 20:50 fim 17/04/2002 21:30				
canal A	canal B	canal C	seq	descrição
1549,837	1550,351	1545,042	3	Ganho de tensão, Ava, Avb, Avc
1252,567	1222,441	1258,317	4	Deslocamento de nível, Dva, Dvb, Dvc (mV)
2	2	8	5	Número de termopares, Nta, Ntb, Ntc
0,04			6	Coeficiente Seebeck, Cs
3,313			7	Tensão aquecedor, E
53,8			8	Resistência, R
0,204014294		0,040802859	9	Calor injetado no segmento, Qin, 20%Qin
0,02			10	Diâmetro do caule, Dc
0,00062832			11	Área da seção, S
0,022			12	Comp. aquecedor, L
0,01			13	Raio interno, r1
0,012			14	Raio externo, r2
0,004			15	Distância entre termopares, dX
0,03			16	Distância entre A-Ha e B-Hb
4,186			17	Calor esp. água, Cp
0,54			18	Condut. term. caule, Kst
0,15			19	Condut.term.sensor radial cortiça, Kco
1,79			20	Const. condutância térmica da sonda, Ksh
950			21	Fluxo máximo, Fmax = Vmax * S
0,75			22	Diferença de temperatura mínima, dTmin
150			23	Tempo entre cada leitura
4			24	Número de somas em cada registro, Ns
600			25	Tempo entre cada registro, tr
725			26	Número total de registros, nr
434400			27	Tempo total, Ta
7240			28	Tempo total, Ta (minutos)

Tabela 4.4: Parte da tabela de processamento dos dados obtidos no registro de fluxo de seiva de uma planta, com valores das constantes usadas para o cálculo do fluxo de seiva.

Neste trecho da planilha, na primeira linha temos as informações gerais da medida, como nome do arquivo, data e hora do início e fim do registro. A seguir são descritas as funções de cada uma das linhas:

- a) Nas linhas 3, 4 e 5 tem-se os valores de ganho e deslocamento de nível dos canais A, B e C, obtidos da calibração dos amplificadores de termopar, como visto no item 5.2, além do número de termopares que geram as respectivas tensões de entradas. Estes valores são

usados para transformar os dados da base decimal inteira fornecida pelo sistema de coleta de dados, para valores de tensão em milivolts.

- b) Na sexta linha consta o Coeficiente de Seebeck que será usado nos cálculos, para converter tensão em temperatura.
- c) Nas linhas 7 a 9 estão os valores relativos a entrada de potência constante no aquecedor, sendo respectivamente: a tensão no aquecedor, a resistência deste e a potência de entrada no segmento.
- d) Da linha 10 a 16 estão os valores dimensionais da sonda, sendo: o diâmetro do caule e respectiva área; o comprimento do aquecedor; o raio interno e externo do medidor de fluxo de calor radial; a distância entre os termopares dos canais A e B; e a distância entre as junções inferiores e superiores dos respectivos canais.
- e) Da linha 16 a 18 estão os valores de propriedades térmicas dos materiais, sendo respectivamente: o calor específico da água; e as condutâncias térmicas do caule e da cortiça.
- f) Da linha 20 a 22, temos alguns parâmetros usados no cálculo do fluxo e valores limitantes onde as equações de balanço de calor apresentam um resultado válido, livre de influências adversas devido a valores de fluxo muito baixo, ou que abaixam além de um limite, permitindo que fluxos de calor invertam de sentido, advindos do ambiente, estes valores são: Constante de condutância térmica da sonda, fluxo máximo e a diferença de temperatura mínima. Estes valores são usados nos filtros de valores válidos de fluxo.
- g) De 23 a 28 tem-se os parâmetros de tempo de amostragens e média de leituras.

Estes valores são entrados na planilha manualmente, e podem ser alterados para se experimentar as devidas propriedades do processo de balanço de calor com aquecimento constante.

Os cálculos do balanço de calor são realizados nas colunas de H até P, sendo:

1. Nas colunas H, I e J, denominadas de Ch(mV), Ah(mV) e Bh(mV) respectivamente, são calculadas as tensões dos canais por termopar, com as respectivas equações:

$$Ch = \frac{\left(\left(\frac{CC}{Ns} 0,6105 \right) - Dvc \right) \frac{1}{Ntc}}{Avc} \quad (\text{mV}) \quad (4.2)$$

$$Ah = \frac{\left(\left(\frac{CA}{Ns} 0,6105 \right) - Dva \right) \frac{1}{Nta}}{Ava} \quad (\text{mV}) \quad (4.3)$$

$$Bh = \frac{\left(\left(\frac{CB}{Ns} 0,6105 \right) - Dvb \right) \frac{1}{Ntb}}{Avb} \quad (\text{mV}) \quad (4.4)$$

2. Na coluna O, é calculado o fluxo de calor radial, denominado Qr (W).

$$Qr = Ksh Ch \quad (\text{W}) \quad (4.5)$$

3. Na coluna N é calculado o fluxo de calor total vertical, denominado Qv (W)

$$Qv = \frac{Kst S (Bh - Ah)}{dX Cs} \quad (\text{W}) \quad (4.6)$$

4. Na coluna P é calculado o fluxo de calor transportado por convecção pelo fluxo de seiva, e é denominado Qf (W)

$$Qf = Qin - Qv - Qr \quad (\text{W}) \quad (4.7)$$

5. O acréscimo de temperatura da seiva, após passar pela sonda é determinado na coluna M da planilha e é denominado dT (°C)

$$dT = \frac{(Ah + Bh)/2}{Cs} \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.8)$$

6. Na coluna L da planilha, é calculada a constante de condutância térmica, para uma determinada instalação. Este valor pode variar ao longo do tempo, devido a acomodações da sonda sobre o caule. Estes valores, em conjunto com a coluna W, são usados para se escolher o novo valor da constante Ksh. O valor escolhido de Ksh deve então ser colocado na área de parâmetros da planilha, e será usada para o re-cálculo do fluxo de seiva em toda a planilha. Na prática, usa-se uma média dos valores válidos de Ksh no período entre 4h e 6h.

$$Ksh = \frac{Q_{in} - Q_v}{Ch} \quad (\text{W/mV}) \quad (4.9)$$

7. Na coluna K da planilha é calculado o fluxo em gramas por hora.

$$F = \frac{Q_f}{C_p dT} 3600 \quad (\text{g/h}) \quad (4.10)$$

Cálculos auxiliares são feitos nas colunas de Q a X da planilha

1. Na coluna Q, denominada registro, tem-se uma seqüencial numerando os registros, iniciando em zero. Esta coluna pode ser usada para ajudar na geração de gráficos onde o eixo x pode ser o tempo em unidades de registros.
2. Na coluna R é calculada a massa por período, ou seja, a quantidade de massa de água que passou no caule no período de tempo entre cada registro. Este valor é usado para fazer a integração da massa total de água em um determinado período (dia, por exemplo).
3. Na coluna S tem-se um seqüencial de data e hora do registro, usado para traçar os gráficos em função do tempo
4. Na coluna T é calculada a temperatura do microcontrolador (sensor interno), onde são usados os valores da coluna TuC da planilha no plano secundário plan2.
5. Na coluna U, o valor de dT da coluna M é multiplicado por 10 para se ajustar na escala de 0 a 50 no mesmo gráfico, onde a escala vertical é fluxo (g/h).

6. Na coluna V é determinado o valor de F_{filtro} , ou seja, um filtro de fluxo com os seguintes condicionantes: se $Q_f < 20\% Q_{in}$ ou $dT < dT_{\text{min}}$, então o valor é zero. Se não o valor é igual a F (g/h).
7. Na coluna W, denominada sinal K_{sh} . Esta coluna é usada para dar uma indicação de fluxo zero onde é possível determinar um K_{sh} válido. O valor de cada registro é determinado da seguinte maneira: se $Q_f < 0$, então o registro é igual a $-0,036$ (um valor muito pequeno que não altera a integração do fluxo), se não o registro é igual a zero. Um valor de K_{sh} é válido quando este registro correspondente é $-0,036$.
8. Na coluna X é colocado o valor de fluxo devidamente filtrado para baixos valores de fluxo, sua denominação é F_{filtro} (g/h) e é determinado pela soma de F_{filtro} (coluna V) com sinal K_{sh} (coluna W). Este é o resultado que é colocado no gráfico do fluxo em função do tempo, mostrado no item 5.4.3. de resultados obtidos.

Da mesma forma que o sistema comercial utilizado na UFPB, este sistema do MFS foi implementado de forma que os resultados não são apresentados em tempo real, mas sim após o processamento dos dados coletados em um determinado período, sendo o mínimo de 24h e um máximo de 42 dias (para registros a cada meia hora). Os resultados podem então ser apresentados em forma gráfica utilizando-se os recursos do Excel, como pode ser visto na Figura 5.7.

A seguir são apresentados os resultados dos experimentos utilizando o protótipo do MFS, incluindo os testes e calibração deste.

5. Experimentos

5.1. Introdução

Apesar do método de balanço de calor usado no medidor de fluxo de seiva de plantas, ser um método sem necessidade de calibração, por não ser um método empírico e sim determinado a partir de medidas de fluxo de calor e características térmicas do caule, o instrumento deve ser calibrado para garantir que as medidas de fluxo de calor estejam corretas. Partindo-se do princípio que a termoeletricidade gerada pelo termopar segue uma curva de tensão versus temperatura, bem determinada e tabelada (coeficiente de Seebeck), basta que o amplificador de termopar e o conversor analógico-digital estejam perfeitamente calibrados (ou com o fator de conversão perfeitamente determinado) para poder-se garantir o resultado do medidor de fluxo de seiva. Desta forma o procedimento de calibração utilizado neste protótipo, consiste em injetar uma tensão conhecida (da ordem de microvolts) na entrada dos amplificadores de termopar e anotar o valor correspondente lido (digital) após o conversor analógico-digital. Assim pode-se determinar o fator de conversão que deve ser usado para converter esta leitura digital em temperatura. Como a variação deste fator de conversão é muito pequena ao longo do tempo (menor que 0,1% ao mês) este procedimento de calibração não precisa ser feito com muita frequência, podendo ser feito manualmente.

5.2. Testes e calibração dos amplificadores de termopar

A calibração do sistema de aquisição de dados composto pelo amplificador de termopar, multiplexador e conversor A/D, é importante para se conhecer os valores de ganho e deslocamento de nível deste sistema. Estes valores influem diretamente no resultado do medidor de fluxo de seiva. É aconselhável que este procedimento seja feito antes de cada série de coleta de dados para garantir a exatidão dos mesmos. Neste protótipo esta rotina é manual, podendo ser automática em futuras implementações.

Para realizar este procedimento basta retirar a sonda da entrada do sistema de aquisição de dados e conectar a fonte de tensão de microvolts previamente calibrada. Ajustando-se os valores predeterminados na fonte de tensão de microvolts, se faz a leitura correspondente em cada canal

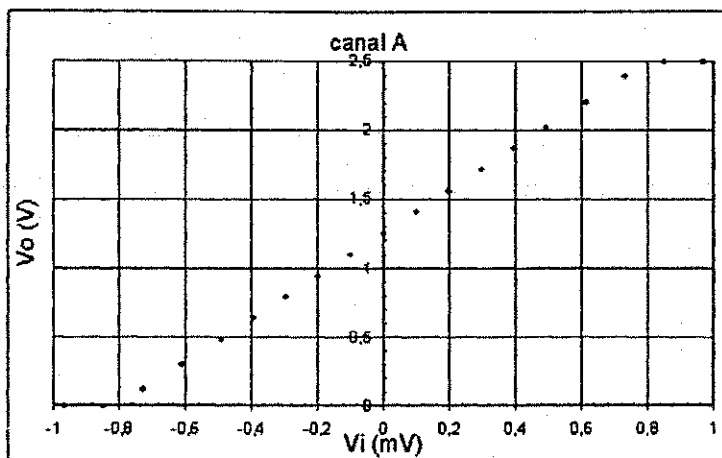
no display do módulo de coleta de dados. Os dados lidos no display, que estão na faixa de 0 a 4095 na base decimal (resolução de 12 bits do conversor A/D), foram convertidos para a faixa de 0 a 2,5V multiplicando-se por 0,0006105. Os resultados das leituras são colocados na Tabela 5.1. Com esta tabela pode-se determinar os parâmetros da reta que relaciona a tensão de entrada com a indicação digital em volts.

Vin(mV)	A: Vo(V)	B: Vo(V)	C: Vo(V)
0,9682	2,499998	2,499998	2,499998
0,848	2,499998	2,499998	2,499998
0,7304	2,385224	2,354699	2,386445
0,6125	2,202074	2,172159	2,204516
0,4948	2,018924	1,989009	2,021976
0,3945	1,864467	1,833942	1,86813
0,2978	1,713674	1,683759	1,717337
0,1975	1,559828	1,529913	1,564712
0,0985	1,405982	1,376067	1,410866
-0,0012	1,252136	1,221611	1,25763
-0,1005	1,09829	1,067765	1,104395
-0,1999	0,944444	0,913919	0,950549
-0,298	0,790598	0,760073	0,797313
-0,3955	0,640415	0,608669	0,64713
-0,4953	0,485348	0,454823	0,493284
-0,6132	0,303419	0,272283	0,310745
-0,731	0,120879	0,089744	0,128816
-0,849	0,004274	0,002442	0,002442
-0,9666	0,004274	0,004884	0,004884

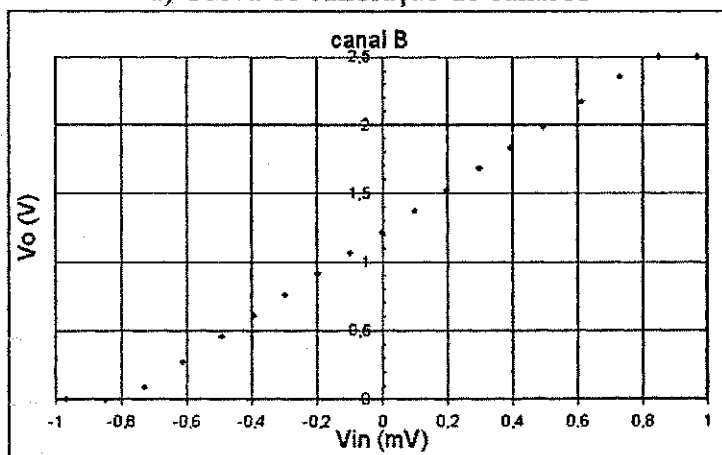
Tabela 5.1: Tabela obtida da calibração manual do módulo de coleta de dados, composto pelo amplificador de termopar e conversor A/D.

A partir destes dados foi calculada em uma planilha Excel, a linearidade e a reta de conversão entre entrada e saída, obtendo-se os seguintes gráficos a, b e c da Figura 5.1, com respectivos valores de ganho e deslocamento de nível apresentados na Tabela 5.2:

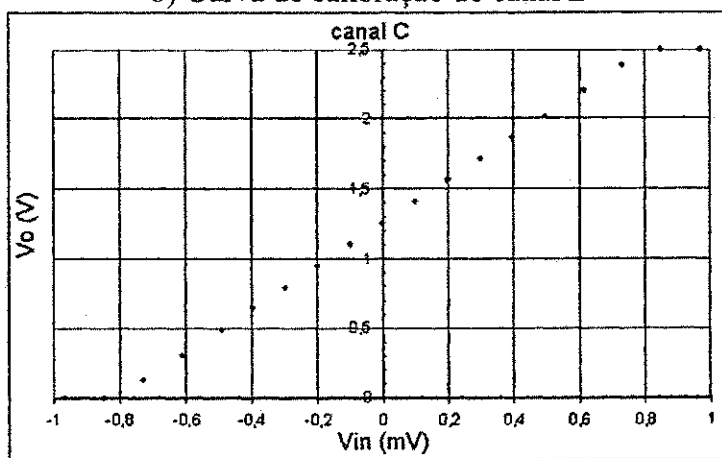
Observou-se nos gráficos obtidos da calibração dos amplificadores de termopar que há uma boa linearidade na faixa de tensão de entrada entre 0,8V e -0,8V. A equação da reta de conversão foi obtida entre os pontos de -0,6V e 0,6 V de entrada, para se garantir estar dentro da região mais linear da faixa de tensão de entrada.



a) Curva de calibração do canal A



b) Curva de calibração do canal B



c) Curva de calibração do canal C

Figura 5.1: Gráficos obtidos da calibração manual do módulo de coleta de dados, composto pelo amplificador de termopar e conversor A/D.

canal A	canal B	canal C	seq.	Descrição
1549,0	1550,1	1544,7	3	Ganho de tensão, Av
1253,2	1222,8	1258,5	4	Deslocamento de nível, Dv (mV)

Tabela 5.2: Resultados obtidos da calibração dos amplificadores de termopar

Foi também calculado o erro dos pontos obtidos na calibração em relação a reta de conversão calculada pelos pontos extremos da faixa linear, sendo encontrado um desvio médio de 0,025% do final de escala, o que equivale a uma variação média de 0,006V, aproximadamente igual para os três canais.

Esta forma de calibração permite calibrar, de uma só vez, todos os estágios entre a entrada de termopar e a saída digital. Neste processo tem-se os seguintes estágios: o amplificador de termopar, deslocamento de nível de tensão contínua, o multiplexador de entradas analógicas e o conversor D/A.

Estes valores são usados na planilha de processamento dos dados obtidos pela sonda.

5.2.1. Variação do zero em instrumentos de medidas

A variação do zero de um instrumento é a mudança gradual do deslocamento do zero indicado, quando não se tem sinal aplicado na entrada do instrumento. A menos que esta variação seja corrigida por um processo de correção do zero, o deslocamento resultante produz um erro que é adicionado ao sinal de entrada. O deslocamento do zero é normalmente especificado como função do tempo e /ou da temperatura. O deslocamento do zero dentro de um período de tempo e de uma variação de temperatura deve permanecer dentro de limites especificados.

5.3. Simulador de caule de planta

Para facilitar os testes e avaliação do sistema se implementou um modelo de caule de planta para simular um tronco de planta. Este tipo de modelo foi usado por Kitano e Cermak (KITANO & EGUCHI, 1989; CERMAK, et al., 1973), variando entre os autores os tipos de materiais porosos que são colocados no interior do tubo por onde é feito passar água com uma vazão conhecida. Adicionalmente, se experimentou um método de medida de fluxo da água que passa no simulador

por meio da contagem de gotas. No item 5.3.2 é feita uma descrição do funcionamento do módulo de medida de fluxo de água por meio volumétrico e no item 5.3.3 a calibração deste.

5.3.1. Montagem do simulador de caule de planta

A construção deste simulador foi feita com tubo de plástico com 200 mm de comprimento, diâmetro de 20 mm, e a espessura da parede de 0,1 mm, preenchido com fibra de celulose e água.

A alimentação de água foi feita a partir de um reservatório com uma altura de coluna de água de 1900 mm e o controle de fluxo feito por uma válvula manual, sendo a medida do fluxo feita por meio volumétrico em relação ao tempo. A Figura 5.1 ilustra o simulador e o feixe de luz onde se faz a contagem das gotas. Com este modelo, pode-se verificar o funcionamento da sonda no laboratório; situações de baixo e alto fluxo podem ser facilmente simuladas, além de ser possível verificar o tempo de resposta para rápidas variações de fluxo.

5.3.2. Sistema de medida de fluxo por meio volumétrico

A função deste módulo é de fazer a medida de fluxo da água que passa no simulador, por meio da contagem das gotas. Esta medida serve de parâmetro de comparação para o valor obtido pela sonda de fluxo de seiva. O volume individual das gotas é determinado previamente por meio de uma calibração usando um frasco de volume conhecido. Este módulo somente é usado, quando se está fazendo testes com o simulador de caule de planta.

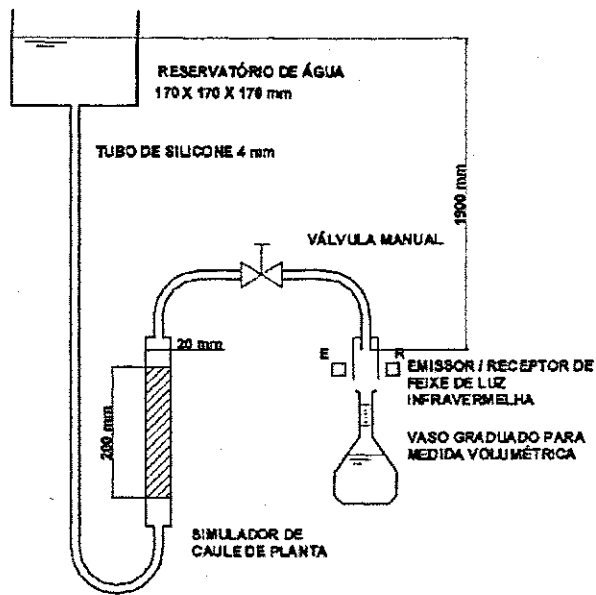


Figura 5.2: Simulador de caule de planta e sistema de medição de fluxo por meio volumétrico

No caso de uso do simulador, a água que sai deste, passa em uma válvula manual do tipo “agulha” onde é feito o ajuste do fluxo de água, que então vai para um bico que forma gotas que caem em queda livre dentro de um tubo vertical transparente com aproximadamente 1,5 cm de diâmetro e 6 cm de comprimento. Transversalmente ao tubo transparente, e a 1,5 cm abaixo do bico formador de gotas, tem um par emissor/receptor de luz infravermelha, capaz de detectar a passagem das gotas pela interrupção do feixe de luz.

O par emissor/receptor está montado em um suporte mecânico que permite fazer um ajuste de forma que a trajetória das gotas passe exatamente pelo feixe de luz infravermelha. O LED 1 na placa do circuito do diagrama esquemático apresentado na Figura 5.3, é usado para facilitar este ajuste. Este LED pisca na passagem da gota pelo feixe de luz infravermelha.

O circuito que interliga o par emissor/receptor de luz com a placa de desenvolvimento ADuC812 é apresentado na Figura 5.3. O emissor de luz infravermelha é alimentado por uma corrente contínua e o sinal gerado pelo receptor passa em um comparador com histerese para gerar um pulso de tensão a cada gota que cai. O sinal gerado por este sistema é então ligado na entrada do contador (T1 / P3.5) do ADuC812. O programa de aquisição de dados, em cada ciclo de aquisição, faz a leitura do contador, registra este valor na memória, apresenta este valor no

display, inicia o contador com zero e espera o próximo ciclo de aquisição. Desta forma, em cada registro da memória tem-se o número de gotas que caíram no intervalo de tempo relativo aquele registro.

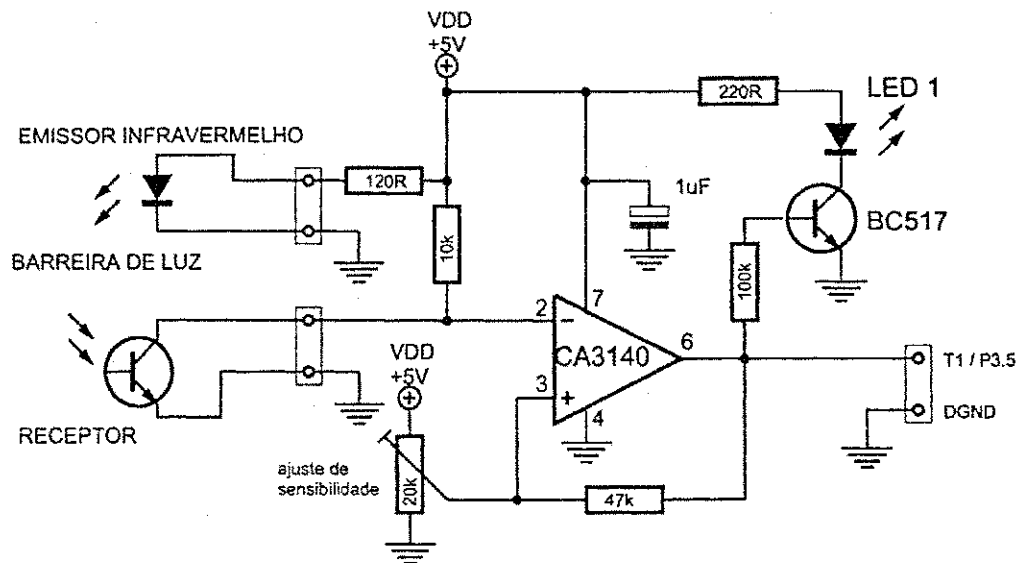


Figura 5.3: Diagrama esquemático do sistema de medida de fluxo volumétrico

Para o uso deste método de medida de fluxo, é necessária sua calibração, que consiste na determinação do volume de cada gota. Este procedimento é apresentado a seguir.

5.3.3. Calibração do sistema de medida de fluxo por meio volumétrico

O sistema de medida de fluxo por meio volumétrico, usando o registro da contagem de gotas em intervalos fixos de tempo, foi calibrado usando-se um frasco de volume precisamente conhecido e um cronômetro (base de tempo do sistema). Medindo-se o número de gotas e o tempo necessário para encher um determinado volume, determina-se o volume individual da gota para um determinado fluxo.

Estas medidas foram feitas para vários valores de fluxo (mantendo-se o valor de fluxo aproximadamente constante durante toda a medida). Durante estas medidas, observou-se que, uma vez ajustado a válvula “agulha”, o fluxo cai lentamente ao longo do tempo sem nenhuma atuação na válvula. Esta diminuição do fluxo é da ordem de 10% por hora, e não é possível fazer

um ajuste fino do fluxo com esta válvula, sendo que uma pequena atuação nesta resulta em uma grande variação no fluxo.

Para se fazer a calibração deste método de medida de fluxo, foi usado um frasco de 250 ml (com erro menor que 0,5%). Inicialmente, foi feita uma série de medidas com valores extremos de fluxo para se determinar se ocorria alguma variação no volume da gota em função do fluxo, chegando-se à conclusão que esta varia entre 0,06 ml, para fluxos da ordem de 28 ml/h (0,13 gotas/segundo); aumenta para 0,07 ml para fluxos da ordem de 1120 ml/h (4,42 gotas/segundo) e volta a diminuir para 0,06 ml quando o fluxo atinge valores da ordem de 1856 ml/h (8,13 gotas/segundo). Como a faixa de variação de fluxo de interesse para este experimento é da ordem de zero a 400 ml/h, foram feitas medidas nesta faixa para se determinar precisamente como o volume da gota variava em função do fluxo. Os resultados são apresentados na Tabela 5.3, concluindo-se que a variação é quase linear variando de 0,062 ml em valores muito baixos de fluxo (aproximadamente zero) até 0,069 ml quando o fluxo atinge valores de 1,95 gotas/segundo (480 ml/h), como pode ser visto no gráfico da Figura 5.4.

volume (ml)	gotas	tempo (s)	gotas/s	período	vol. gota (ml)	fluxo (ml/h)
				da gota (s)		
250	4030	31704	0,127113	7,866998	0,062035	28,38759
250	3962	11154	0,355209	2,815245	0,063099	80,68854
250	3892	6818	0,570842	1,751799	0,064234	132,0035
250	3838	4778	0,803265	1,244919	0,065138	188,3633
250	3799	3780	1,005026	0,994999	0,065807	238,0952
250	3740	2962	1,26266	0,791979	0,066845	303,8488
250	3703	2522	1,468279	0,681069	0,067513	356,8596
250	3662	2084	1,757198	0,569088	0,068269	431,8618
250	3658	2024	1,807312	0,553308	0,068343	444,664
250	3644	1859	1,960194	0,510154	0,068606	484,1313

Tabela 5.3: Resultados da calibração do sistema de medida de fluxo por meio volumétrico.

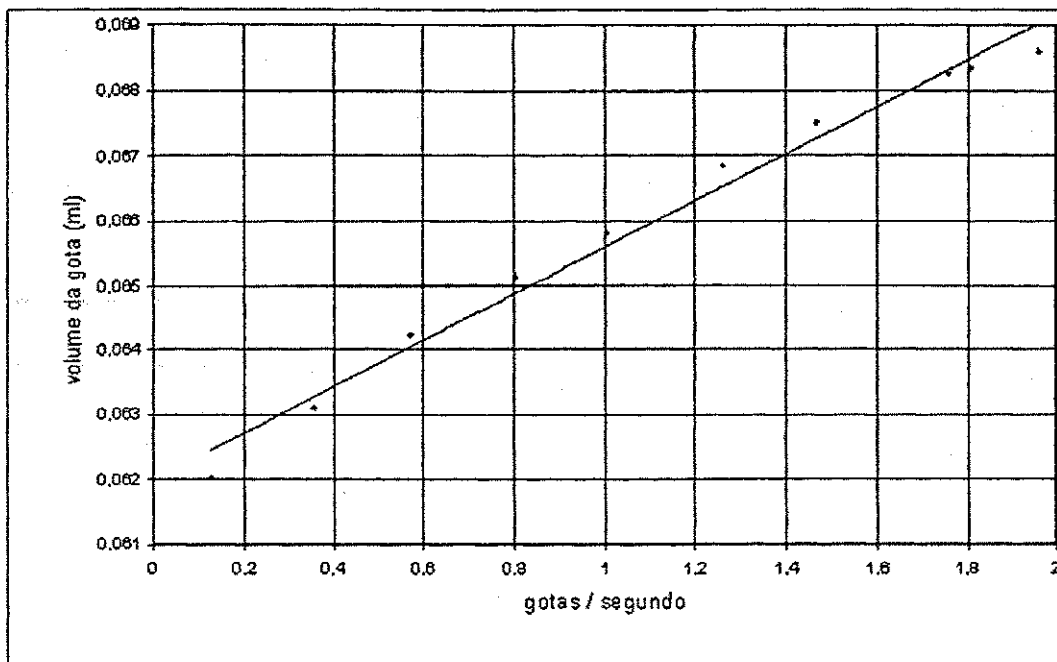


Figura 5.4: Variação do volume da gota em função do fluxo em gotas/segundo.

Observa-se, ainda, que os dados obtidos se referem a condições específicas deste experimento, que foram mantidas, ou consideradas constantes ao longo do tempo, como: o tipo de bocal formador das gotas, temperatura, umidade e pressão ambiente e outras variáveis que possam interferir nos resultados.

Como o volume da gota varia com o valor do fluxo, este método é limitado a medida de fluxo que permanecem praticamente constante. Nestas condições pode-se considerar o volume da gota constante e então determinar o fluxo pela contagem das gotas em um período de tempo constante.

Assim foram conseguidos alguns pontos de comparação do valor medido pela sonda com o valor de fluxo medido pelo método volumétrico de contagem das gotas, evitando-se fazer variações de fluxo durante as medidas deste ponto de comparação. Além disso, foi dado um tempo de aproximadamente 1 hora para se atingir o equilíbrio térmico na sonda antes de se fazer o registro deste ponto de comparação. Esta dificuldade limitou o uso do simulador, não permitindo o uso deste na avaliação do desempenho dinâmico da sonda.

A seguir são apresentados os resultados dos testes de comparação dos valores lidos pela sonda, com os valores lidos no simulador.

5.3.4. Testes no simulador

Para os testes de funcionamento e avaliação da exatidão do medidor, foram feitas leituras mantendo-se valor de fluxo o mais estável possível e esperado um tempo para estabilização térmica, da ordem de 30 minutos, só então após este período, foi feito o registro das leituras em intervalos de 2 segundos durante 4090 s. Este procedimento foi realizado para 5 valores de fluxo entre 10 e 90 ml/h. Um dos gráficos, assim obtido, pode ser visto na Figura 5.5.

Foi observado ainda que devido ao volume de cada gota ser de aproximadamente de 0,065 ml, para se ter uma resolução de leitura de fluxo de, por exemplo, 0,5 ml/h, é necessário integrar a contagem das gotas em um intervalo de tempo de, no mínimo, 7,8 minutos; isto explica porque a linha do registro do fluxo medido por meio volumétrico está com valor nulo entre o instante de tempo zero e 468 segundos. Ocorre que neste intervalo de tempo não se tem um número suficiente de gotas para determinar o fluxo com uma precisão razoável. A partir deste instante é feita a integração do número de gotas nos 468 segundos anteriores a cada leitura.

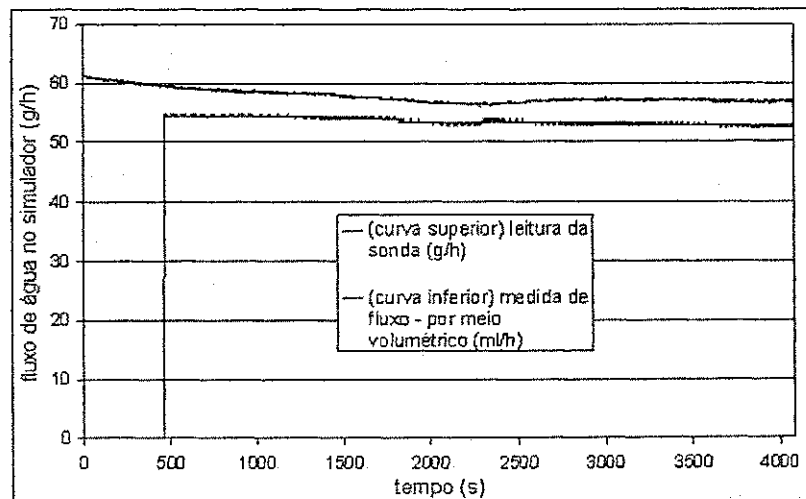


Figura 5.5: Registro da leitura da sonda e valor de fluxo medido por meio volumétrico no simulador de caule de planta.

Nos cinco gráficos obtidos no simulador de caule de planta, pode-se observar o funcionamento do MFS, que acompanha a pequena variação do fluxo de água no simulador. Observa-se ainda como variações de temperatura externa influencia no MFS, de onde se conclui a importância de se fazer uma boa blindagem térmica na sonda.

O uso do simulador de caule de planta para teste do MFS auxilia também no treinamento das técnicas de instalação e operação do MFS, pois reproduz de uma maneira muito real o uso do MFS no campo de aplicação a que se propõe.

5.3.5. Avaliação dos resultados no simulador

Fazendo-se então uma seleção de vários pares de valores de leitura da sonda versus fluxo medido por meio volumétrico, foi montado um gráfico comparativo mostrado na Figura 5.6. Observa-se neste gráfico que os pontos obtidos estão próximos da reta de inclinação 1:1, apresentando um desvio médio de 12%. O erro encontrado pode ser atribuído a uma diferença na escolha dos valores da condutibilidade térmica, tanto do simulador de caule de planta, quanto da cortiça usada no sensor de fluxo de calor radial, pois estes dados foram obtidos com um número reduzido de experimentos.

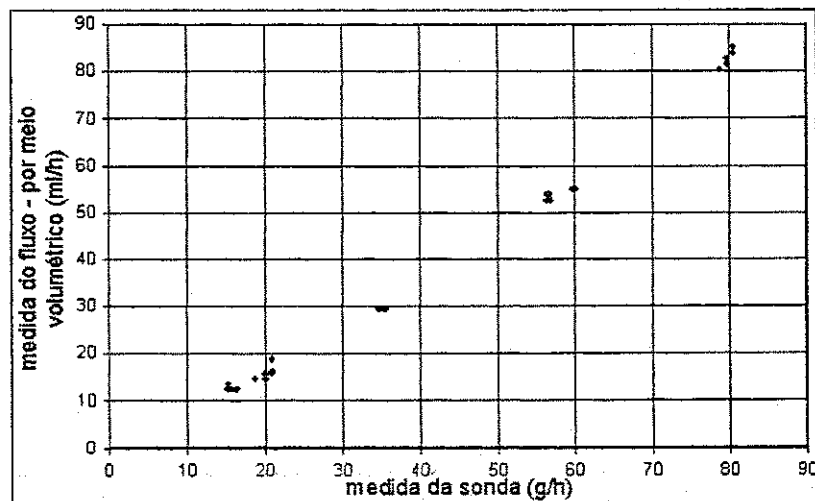


Figura 5.6: Gráfico comparativo da leitura da sonda e valor de fluxo medido no simulador de caule de planta.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por SAKURATANI (1981) e foram apresentados em CORRÊA et al. (2002).

Após os testes do MFS no simulador de caule de planta, este foi removido e instalado em um caule com aproximadamente 20 mm de diâmetro, de uma muda enxertada de laranja, conforme é descrito a seguir.

5.4. Testes de medidas em plantas

As medidas de avaliação de desempenho do MFS em um lisímetro é uma prática comum a grande maioria dos artigos consultados (BAKER & VAN BAVEL, 1987; DEVITT et al., 1993; DUGAS, 1990; GRIME et al. 1995 a; GROOT & KING, 1992; HAM & HEILMAN, 1990; SAKURATANI, 1981).

Para se ter um resultado mais preciso seria necessário usar uma balança com resolução melhor do que a que foi utilizada. Apesar disto, os resultados dão uma boa indicação do funcionamento do MFS.

A seguir é descrita a espécie de planta usada no experimento, assim como os detalhes da montagem do lisímetro e da coleta e processamento de dados; por fim, dos resultados alcançados.

5.4.1. Espécime sob medida e lisímetro de pesagem

Foi utilizada uma muda enxertada de laranja Bahia (identificação: Porta enxerto / Limão Cravo / L. BAHIA - Luiz Loures Filho / Sitio Chopotó / D. Euzébia MG / Reg. IMA: 4301/P), plantada em um balde de plástico (sem furo de drenagem) de 5 litros com terra orgânica, adubada e molhada. A superfície exposta da terra foi coberta com folha de papel alumínio e foi colocado um tubo flexível de plástico com aproximadamente 20 centímetros com uma extremidade introduzida aproximadamente no centro volumétrico radicular da planta e a outra extremidade fixada com um barbante ao caule da planta, acima da borda do balde. A área entre a borda do balde e o caule foi vedada com filme plástico de PVC. A extremidade livre do tubo foi dobrada a aproximadamente 1 centímetro da extremidade e mantida dobrada com um clipe para completar a vedação total do ambiente interior do balde. Mais uma camada de papel alumínio foi colocada

sobre o filme de PVC para evitar o aquecimento da terra contida no balde. Desta forma, a água perdida dentro do balde só pode ocorrer por transpiração da planta. A reposição desta água perdida diariamente se faz pelo tubo plástico com a retirada do clipe.

O sistema constituído pelo balde e a planta, foi colocado sobre uma balança com capacidade de 15 Kg e resolução de 5 g. O peso medido foi de 6700 g. Este peso foi monitorado diariamente pela balança e, aproximadamente às 20h, era adicionado água em quantidade suficiente para que o peso do sistema vaso-planta retornasse ao seu valor inicial (lisímetro de pesagem). A quantidade de água repostada neste horário era registrada para servir de referência ao valor medido pelo protótipo do instrumento de medida de fluxo de seiva.

Na Figura 5.7 pode-se ver a fotografia do lisímetro descrito anteriormente, na parte inferior à direita está a balança digital e na parte superior esquerda pode-se ver o protótipo do MFS.

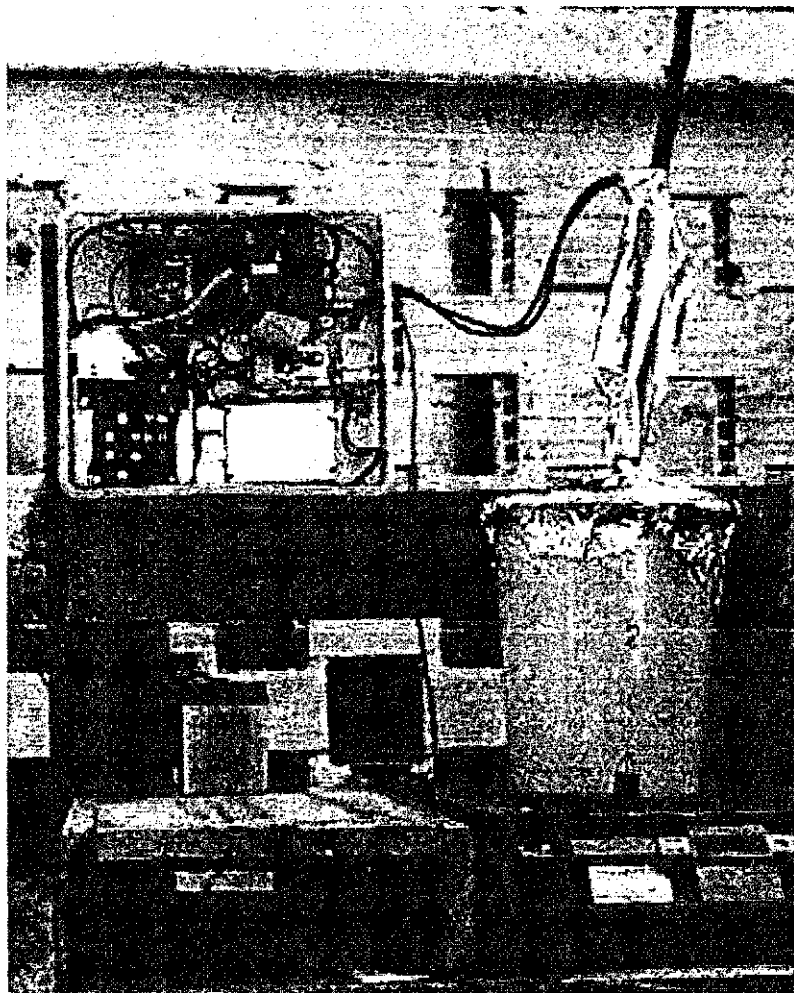


Figura 5.7: Fotografia do lisímetro de pesagem com o medidor de fluxo de seiva.

O lisímetro assim construído foi instalado em Campina Grande-PB em uma casa de vegetação recoberta com plástico transparente para evitar vento e chuva. Foi observado que a planta recebia uma sombra entre o horário de 12h até 13h de um obstáculo próximo a esta. No período de 9/3/2002 a 11/4/2002 foram feitas leituras da perda de água obtendo-se uma média de 133 g de água por dia, sendo o mínimo de 60 g registrado em um dia nublado com chuva no período e um máximo de 220 g em um dia ensolarado. Este procedimento foi feito com o objetivo de se verificar o comportamento do vegetal ao seu novo ambiente, sendo observado um pequeno crescimento neste período, além de se conhecer a ordem de grandeza do fluxo de água transpirada pela planta.

5.4.2. Registro e processamento dos dados coletados da planta

A sonda de fluxo de seiva foi testada por um período de 5 dias consecutivos, iniciando em 12/04/2002 às 20h 50min e terminando em 17/04/2002 às 21h 30min. A taxa de amostragem foi de 30 segundos entre cada leitura sendo registrado a média a cada 2 minutos (uma média a cada 4 leituras). Houve uma interrupção na coleta de dados de 4 minutos no dia 14/04 às 21h 56min e de 6 minutos no dia 16/04 às 21h para transferir os dados coletados para o microcomputador. Desta forma foram gerados 3 arquivos que posteriormente foram processados em uma planilha Excel. Como se verificou que havia um excesso de dados gerados pela alta taxa de amostragem, foi então gerada uma planilha contendo os 5 dias, mas com uma re-amostragem de 1 média a cada 5 registros. Desta forma os registros passaram a corresponder a uma média a cada 10 minutos, que é um valor muito bom para o período de estudo de 5 dias.

5.4.3. Resultados de medidas de fluxo de seiva na planta

Os resultados obtidos do MFS podem ser apresentados normalmente de duas maneiras: totalizando-se o fluxo durante um determinado período, como por exemplo, diariamente ou traçando-se o fluxo instantâneo (em cada registro) em função do tempo, sendo o mais comum, em períodos de um dia. Existe também a possibilidade de se traçar a transpiração diária acumulada da planta por um grande período (meses), para se avaliar o consumo de água durante uma fase de crescimento desta. Este tipo de apresentação não foi realizado neste trabalho.

Na Figura 5.8 é apresentado o gráfico do consumo instantâneo de água da planta sob teste, e na Tabela 5.4 são apresentados os mesmos dados de forma acumulada diária para se fazer a comparação com os valores de consumo de água obtidos do lisímetro de pesagem.

Observa-se que o fluxo máximo de seiva ocorre próximo ao meio – dia, atingindo valores na faixa de 50 g/h. Caso não ocorresse a sombra sob a planta neste horário, certamente este valor seria bem superior. O consumo diário de água da planta teve uma média de 178g/dia, atingindo um máximo de 198,8g em um dia intermediário do período.

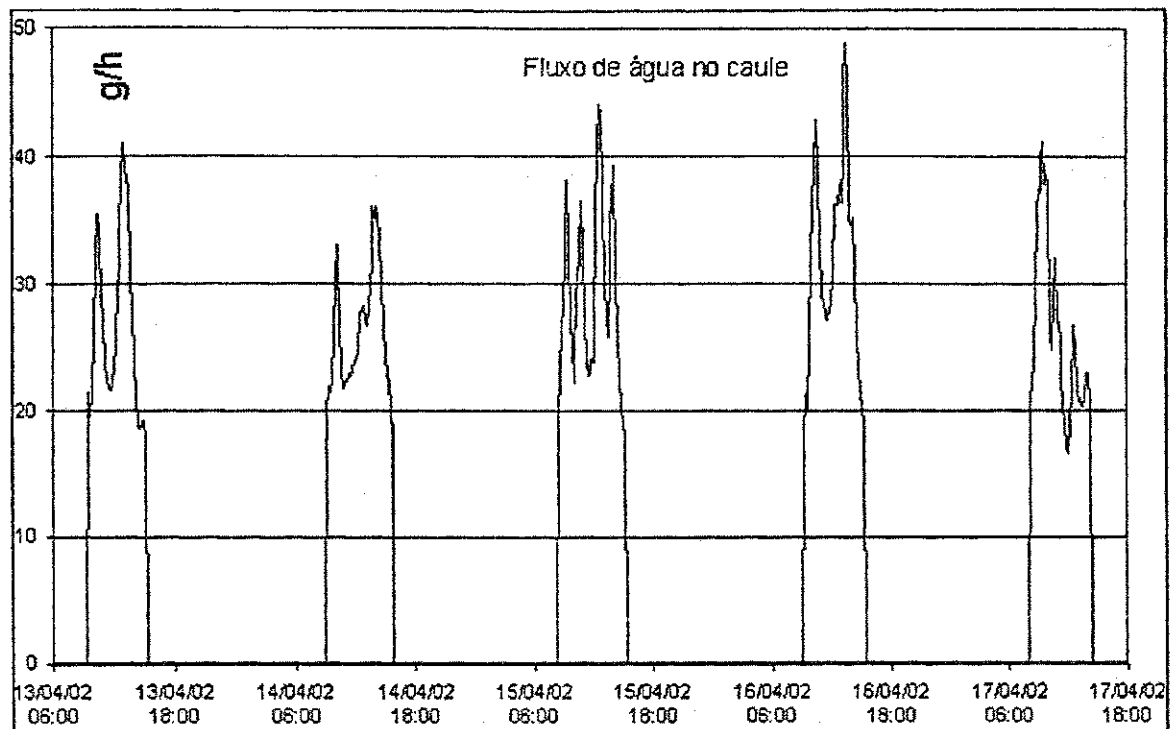


Figura 5.8: Resultado obtido das leituras de fluxo no caule da planta

Na tabela 5.4 temos os valores totalizados diariamente para a quantidade de água consumida pela planta, e o respectivo valor registrado pelo lisímetro de pesagem.

A comparação dos resultados de consumo diário da planta, medido pelo protótipo de MFS, com o consumo diário, medido na balança do lisímetro, dá uma indicação da precisão deste instrumento. O erro percentual diário entre as duas leituras variou entre -4,8% e +7,4% no período de 5 dias de medidas. A diferença da leitura acumulada nestes 5 dias indica que o MFS acusou um resultado de 1,9% maior que o consumo acumulado medido na balança.

período	medido (g)	água reposta (g)	erro %
dia 13 de 0:00 a 24:00 (lin. 22 a 165)	157,074	165	-4,803626954
dia 14 de 0:00 a 24:00 (lin. 166 a 309)	175,81	170	3,417731889
dia 15 de 0:00 a 24:00 (lin. 310 a 453)	198,785	185	7,451314889
dia 16 de 0:00 a 24:00 (lin. 454 a 597)	197,797	190	4,103687901
dia 17 de 0:00 a 21:30 (lin. 598 a 727)	162,338	165	-1,613389925

Tabela 5.4: Resultado obtido das leituras de fluxo no caule da planta

6- Conclusões

Neste trabalho foi estudado o método de medida de fluxo de seiva pelo uso do princípio de balanço de calor em segmento de caule, com aquecimento constante. Este base teórica permitiu a construção de um protótipo de medidor de fluxo de seiva (MFS) com o uso de um microconversor ® e de um programa para processamento dos dados coletados.

Também foram apresentadas considerações específicas para o projeto e necessárias para a construção do protótipo. Estes aspectos são de muita importância para este tipo de trabalho, devido as características particulares da aplicação, onde é requerido o funcionamento por longos períodos e sob condições climáticas adversas. Além disso, os aspectos de precisão dos resultados são rigorosos.

A operação do MFS apesar de simples, ainda necessita de melhoramentos para permitir seu uso por pessoal especializado, principalmente no que se refere à interface homem-máquina. No atual estágio do protótipo, a alteração dos parâmetros de aquisição de dados tem que ser feita pela reprogramação do microcontrolador. Apesar de ser um sistema dedicado, foi mantida uma construção modular e aberta, permitindo ser devidamente testado e avaliado.

O protótipo do medidor de fluxo de seiva - MFS teve um bom desempenho em todas as fases de teste (simulador e lisímetro) não apresentando nenhuma falha ou deficiência de desempenho.

A precisão alcançada pelo protótipo atendeu as expectativas, confirmando tanto o método como a solução proposta para a montagem do protótipo do MFS. Este projeto apresenta uma solução eficiente e de custo reduzido para o desenvolvimento de instrumentos usados no estudo da fisiologia vegetal e que também pode ser usado para o controle de irrigação de plantações.

Dificuldades

A maior dificuldade encontrada neste trabalho eminentemente prático, foi a de encontrar um meio que estivesse dentro das possibilidades materiais e laboratoriais disponíveis, de se

ajustar, medir e controlar um fluxo de água na faixa de 0 a 400 ml/h no simulador de caule de planta. Mesmo com esta dificuldade, trabalhando-se dentro dos limites aceitáveis impostos pelo equipamento disponível, foi possível obter dados confiáveis, permitindo concluir este trabalho. O simulador de caule de planta pode ser usado com todas as suas possibilidades se for usada uma bomba peristáltica para o controle de fluxo de água que passa nesta.

Propostas de novos trabalhos

Com o objetivo de se desenvolver este protótipo até que se chegue a um modelo que possa ser aplicado no campo agrícola, tanto com fins de pesquisa quanto de controle de irrigação, são apresentadas algumas propostas perfeitamente viáveis de serem implementadas, tais como:

- Interface homem máquina

Esse protótipo de MFS pode ter um desempenho melhorado no aspecto funcional, desenvolvendo uma interface homem – máquina mais elaborado, incluindo horário para reduzir o aquecimento da sonda.

- Balanço de calor com aquecimento variável

Podem ser implementados os métodos desenvolvidos para o balanço de calor com aquecimento variável, que apresentam um desempenho superior ao balanço de calor com aquecimento constante tal como proposto por ISHIDA et al. (1991); PERESSOTTI & HAM (1996); WEIBEL & BOERSMA (1995) e outros, sem muitas modificações de circuitos, bastando modificar os programas de controle e coleta de dados do microcontrolador.

- Retenção de dados no caso de falta de energia

Esta característica é muito importante em um sistema de coleta de dados, principalmente quando se trabalha com longos períodos, como por exemplo, meses. Neste protótipo foi usado uma bateria chumbo-ácido em conjunto com uma fonte foto-voltáica (painel solar), o que dá bastante confiabilidade ao sistema.

- Auto calibração e auto teste

A calibração deste protótipo é feita manualmente com o auxílio da interface homem máquina, porém para uma aplicação de campo este procedimento pode ser automatizado, incluindo no equipamento a fonte de referência de microvolts, facilitando o uso do MFS no campo agrícola.

- Sensor de temperatura absoluto

Para o uso deste medidor em plantas com diâmetro maior que 30 mm, é recomendado usar o termo de calor armazenado, na equação de balanço de calor, como descrito no item 2.2, neste caso deve-se implementar um sensor de temperatura absoluto para se determinar a temperatura média do segmento do caule.

Referências bibliográficas

- ANFODILLO, T.; SIGALOTTI, G. B.; TOMASI, M.; SEMENZATO, P.; VALENTINI, R. Applications of a thermal imaging technique in the study of the ascent of sap in woody species. **Plant, Cell and Environment**, v. 16, p. 997-1001, 1993.
- ANGELOCCI, Luiz Roberto. **Necessidade hídrica de frutíferas**. Piracicaba, USP, 2001, Available from: <http://www.mko.com.br/jornalagapomi/pesquisa> . Acesso em: 08 jun. 2001.
- ANSI. **MC96.1 1975 For temperature measurement thermocouples**. Instrument Society of America, Pittsburgh, 1975.
- BAKER, J. M.; VAN BAVEL, C. H. M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, v. 10, p. 777-782, 1987.
- BAKER, J. M.; NIEBER, J. L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 48, p. 93-109, 1989.
- BECKER, Peter. Limitations of a compensation heat pulse velocity system at low sap flow: implications for measurements at night and in shaded trees. **Tree Physiology**, Victoria, v. 18, n. 3, p. 177-184, March 1998.
- BEJAN, Adrian. Cascas cilíndricas. In: **Transferência de Calor**, São Paulo, Edgard Blucher, 1996. cap. 2, p. 31-34.
- BEVIR, M. K. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 43, p. 577-90, 1970.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. Datalogger Product Line. **Internet Home Page**. Logan, Available from: <http://www.campbellsci.com>. Acesso em: 08 jun. 2001.
- CASPARI, H. W.; GREEN, S. R. ; EDWARDS, W. R. N. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67, p. 13-27, 1993.

- CERMAK, J.; DEML, M.; PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum (PRAHA)**, v. 15, n. 3, p. 171-178, 1973.
- CERMAK, J.; HUZULAK, J.; PENKA, M. Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of root system depth. **Biologia Plantarum (PRAHA)**, v. 22, n. 1, p. 34-41, 1980.
- CERMAK, J.; KUCERA, J.; PENKA, M. Improvement of the method of sap flow rate determination in full-grown trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. **Biologia Plantarum (PRAHA)**, v. 18, n. 2, p. 105-110, 1976a.
- CERMAK, J.; PALAT, M.; PENKA, M. Transpiration flow rate in a full-grow tree of *Prunus avium* L. estimed by the method of heat balance in connection with some meteorological factors. **Biologia Plantarum (PRAHA)**, v. 18, n. 2, p. 111-118, 1976b.
- CERMAK, Jan; JENIK, Jan; KUCERA, Jiri; ZIDEK, Vladimir. Xylem water flow in a crack willow tree (*Salix fragilis* L.) in relation to diurnal changes of environment. **Oecologia**, Berlin, v. 64, p. 145-151, 1984.
- CERMAK, Jan; KUCERA, J. The compensation of natural temperature gradient at the measuring point during the sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum (PRAHA)**, v. 23, n. 6, p. 469-471, 1981.
- CHANDRA, S.; LINDSEY, P. A.; BASSUK, N. L. A gauge to measure the mass flow rate of water in trees. **Plant, Cell and Environment**, v. 17, p. 867-874, 1994.
- CLEARWATER, Michael J.; MEINZER, Frederick C.; ANDRADE, José Luis; GOLDSTEIN, Guillermo; HOLBROOK, N. Michelle. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology**, Victoria, v. 19, p. 681-687, 1999.
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; FALKENFLUG, V.; MORESHET, S. Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton. **Agronomy Journal**, v. 80, p. 398-402, 1988.
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; GREEN, G. C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. **Plant, Cell and Environment**, v. 4, p. 391-397, 1981.

- COHEN, Y.; LI, Y. Validating sap flow measurement in field-grown sunflower and corn. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, p. 1699-1707, 1996.
- COHEN, Y.; TAKEUCHI, S.; NOZAKA, J.; YANO, T. Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods. **Agronomy Journal**, v. 85, p. 1080-1086, 1993.
- CORRÊA, Agesandro Caetano; ROCHA NETO, José Sérgio da; SILVA, Bernardo Barbosa. Medidor de fluxo de seiva com balanço de calor caulinar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14, Natal, setembro de 2002. **Anais CDROM**. Natal, Sociedade Brasileira de Automática, 2002. 615.pdf.
- DAUM, C. R. A method for determining water transport in trees. U. S. Geological Survey, Denver, Colorado, accepted for publication February 27, 1967 **Ecology**, v. 48, p. 425-431, 1967.
- DEVITT, D. A.; BERKOWITZ, M.; SCHULTE, P. J.; MORRIS, R. L., Estimating transpiration for three woody ornamental tree species using stem-flow gauges and lysimetry. **HortScience**, v. 28, n. 4, p. 320-322, 1993.
- DUGAS, W. A.; PRIOR, S. A.; ROGERS, H. H. Transpiration from sorghum and soybean growing under ambient and elevated CO₂ concentrations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 83, p. 37-48, 1997.
- DUGAS, William A. Comparative measurement of stem flow and transpiration in cotton. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, p. 215-221, 1990.
- DYE, P.; SOKO, S.; POULTER, A. Evaluation of the heat pulse velocity method for measuring sap flow in *Pinus patula*. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, p. 975-981, 1996.
- DYNAMAX INC. Dynagage Sap Flow Sensors. **Internet Home Page**. Houston, Available from: <http://www.dynamax.com>. Acesso em: 08 jun. 2001.
- EDWARDS, W. R. N.; BECKER, P.; CERMAK, J. A unified nomenclature for sap flow measurements. **Tree Physiology**, Victoria, v. 17, p. 65-67, 1997.

- FICHTNER, K.; SCHULZE, E. D. Xylem water flow in tropical vines as measured by a steady state heating method. *Oecologia*, v. 82, p. 355-361, 1990.
- GARCIA, Adolfo. Single-Supply Amplifiers. In: **Practical Analog Design Techniques**. Walt Kester. Norwood, MA: Analog Device, Inc., 1995. ISBN 0-916550-16-8 Available from: <http://www.analog.com/technology/amplifiersLinear/training/practicalDesign.html> Acesso em: 20 out. 2002.
- GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, v. 42, p. 193-200, 1985.
- GRIME, Vikki L.; MORISON James I. L.; SIMMONDS Lester P. Sap flow measurements from stem heat balances: a comparison of constant with variable power methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 74, n. 1, p. 27-40, 1995a.
- GRIME, Vikki L.; MORISON James I. L.; SIMMONDS Lester P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 74, n. 1, p. 1-25, 1995b.
- GRIME, Vikki L.; SINCLAIR, F. L. Sources of error in stem heat balance sap flow measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 94, n. 2, p. 103-121, 1999.
- GROOT, Arthur; KING, Kenneth M. Measurement of sap flow by the heat balance method: numerical analysis and application to coniferous seedlings. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 59, p. 289-308, 1992.
- HAM, J. M.; HEILMAN, J. L. Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow. *Agronomy Journal*, v. 82, p. 147-152, 1990.
- HERZOG, Karl Martin; THUMA, Roland; ZWEIFELA, Roman; HÄSLERA, Rudolf . Heat balance measurements-to quantify sap flow in thin stems only? *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 83, n. 1-2, p. 75-94, 1997.
- HLA, Aung K.; TIPTON, Jimmy L.; WALLER, Peter M. Sap flow gauge measurement of transpiration for acacia and mesquite trees. **ASEA Meeting presentation**, Minneapolis, Minnesota, August, 1997.

- INAMASSU, Ricardo Yassushi. **Coletor de dados: um subsídio para escolha.** São Carlos, EMBRAPA, Dez. 1996. (Boletim de pesquisa EMBRAPA, N. 1/96).
- ISHIDA, Tomoyasu; CAMPBELL, Gaylon S.; CALISSENDORFF, Cornelis. Improved heat balance method for determining sap flow rate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 56, p. 35-48, 1991.
- KALMA, Steven J.; THORBURN, Peter J.; DUNN, Greg M. A comparison of heat pulse and deuterium tracing techniques for estimating sap flow in *Eucalyptus grandis* trees. **Tree Physiology**, v. 18 n. 10, p. 697-706, October 1998.
- KEITHLEY. **Low Level Measurements: For effective low current, low voltage and high impedance measurements.** 3ª ed. Ohio: Keithley Instruments, Inc., 1984.
- KITANO, Masaharu; EGUCHI, Hiromi. Quantitative analysis of transpiration stream dynamics in an intact cucumber stem by a heat flux control method. **Plant Physiol.**, v. 89, p. 643-647, 1989.
- KJELGAARD, J. F.; STOCKLE, C. O.; BLACK, R. A.; CAMPBELL, G. S. Measuring sap flow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 85, p. 239-250, 1997.
- KUCERA, J.; CERMAK, J.; PENKA, M. Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. **Biologia Plantarum**, v. 19, p. 413-420, 1977.
- LASCANO, R. J.; BAUMHARDT, R. L.; LIPE, W. N. Measurement of water flow in young grapevines using the stem heat balance method. **Am. J. Enol Vitic.**, v. 43, n. 2, p. 159-165, 1992.
- LU, Ping. A direct method for estimating the average sap flux density using a modified Granier measuring system. **Aust. J. Plant Physiol.** V. 24, p. 701-705, 1997.
- MAIER-MAERCKER, Uta. Experiments on the water balance of individual attached twigs of *Picea abies* (L.) Karst. in pure and ozone-enriched air. **Trees**, v. 11, p. 229-239, 1997.
- NAVES-BARBIERO, Cheila Cristina; FRANCO, Augusto César; BUCCI, Sandra Janet; GOLDSTEIN, Guilherme. Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies

- lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. *R. Bras. Fisiol. Veg.*, v. 12, n. 2, p. 119-134, 2000.
- OLIVEIRA, Maria Betânia Leal de; SILVA, Bernardo Barbosa da. Sonda para medir fluxo de seiva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12, Fortaleza, julho de 2001. *Anais*. Fortaleza, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p. 911-912.
- PERESSOTTI, A.; HAM, J. M. A dual-hearter gauge for measuring water flow with an improved heat balance method. *Agronomy Journal*, v. 88, p. 149-55, 1996.
- SADDLER, H. D. W.; PITMAN, M. G. An apparatus for the measurement of sap flow in unexcised leafy shoot. *Journal of Experimental Botany*, v. 21, p. 1048-59, 1970.
- SAKURATANI, Tetsuo. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, Tokyo, v. 37, n.1, p. 9-17, 1981.
- SAKURATANI, Tetsuo. Studies on evapotranspiration from crops (2) separate estimation of transpiration and evaporation from a soybean field without water shortage. *J. Agr. Met.*, v. 42, n.4, p. 309-317, 1987.
- SCHULZE, E. D.; CERMAK, Jan; MATYSSEK, R.; PENKA, M.; ZIMMERMANN, R.; VASICEK, F.; GRIES, W.; KUCERA, Jiri. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of Larix and Picea trees – a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia*, Berlin, v. 66, p. 475-483, 1985.
- SENOCK, R. S.; HAM, J. M. Heat balance sap flow gauge for small diameter stems. *Plant, Cell and Environment*, v. 16, p. 593-601, 1993.
- SHACKEL, K. A.; JOHNSON, R. S.; MEDAWAR, C. K.; PHENE, C. J. Substantial erros in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 117, p. 351-6, 1992.
- SHERIFF, D. W. A new apparatus for the measurement of sap flux in small shoot with the magnetohydrodynamic method. *Journal of Experimental Botany*, v. 23, p. 1086-1095, 1972.

- SILVA, Bernardo Barbosa da; SLACK, Donald Carl; KILBY, Michael W.; HLA, Aung Kyaw. Measurements of water requirements of table grapes in Arizona (USA) **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 175-183, 2000.
- SMITH, D. M.; ALLEN, S. J. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, p. 1833-1844, 1996.
- STEINBERG, S. L.; VAN BAVEL, C. H. M.; McFARLAND, M. J. Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. **Agronomy Journal**, v. 82, p. 851-4, 1990.
- STEINBERG, Susan; VAN BAVEL, Cornelius H. M.; McFARLAND, Marshall J. A Gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. **J. Amer. Soc. Hort. Sci.**, v. 113, n. 3, p. 466-472, 1989.
- SWANSON, R. H.; WHITFIELD, D. W. A. Numerical analysis of heat pulse velocity theory. **Journal of Experimental Botany**, v. 32, p. 221-239, 1981.
- SWANSON, Robert H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 72, p. 113-32, 1994.
- VAN PUTTEN, Anton F.P. **Electronic Measurement Systems: theory and practice**. 2^a ed. Philadelphia: Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1996.
- VAN ZEE, G. A.; SCHURER K. On-Line estimation of the rate of sap flow in plant stems using stationary thermal response data. **Journal of Experimental Botany**, v. 34, p. 1636-1651, 1983.
- WARING, R. H.; ROBERTS, J. M. Estimating water flux through stems of Scots pine, *Pinus sylvestris*, with tritiated water and phosphorus-32. **Journal of Experimental Botany**, v. 30, p. 459-72, 1979.
- WEIBEL, Franco-Peter; BOERSMA, Klaas. An improved stem heat balance method using analog heat control. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 75, p. 191-208, 1995.
- ZHANG, Jingxian; KIRKHAM, M. B. Sap flow in a Dicotyledon (sunflower) and a Monocotyledon (sorghum) by the heat-balance method. **Agronomy Journal**, v. 87, p. 1106-1114, 1995.

ZUCH, E.L. Signal Data Conversion. In: SYDENHAM, Peter H. (ed) **Handbook of Measurement Science. Theoretical Fundamentals.** v. 1. Chichester: John Wiley and Sons, 1982. cap. 12, p. 489-538.

Apêndice A. Tabela de classificação dos métodos de medida de fluxo de seiva em plantas

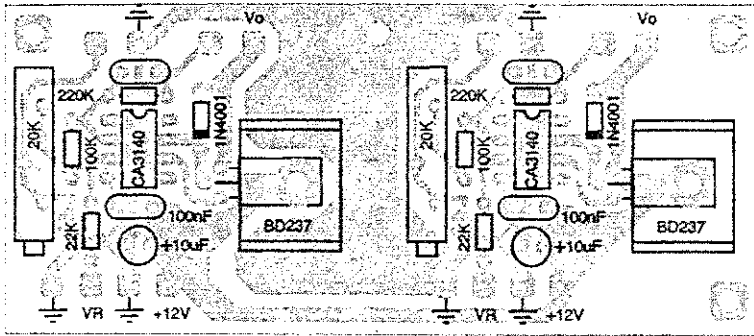
Elemento traçador	Método	Diâmetro Aplicável	Publicações consultadas		
Calor	Velocidade de pulso de calor (HPV) (CHPV)	>62mm	COHEN et al. (1981), SWANSON & WHITFIELD (1981), COHEN et al. (1988), CASPARI et al. (1993), COHEN et al. (1993), SWANSON (1994), COHEN & LI (1996), DYE et al. (1996), SMITH & ALLEN (1996), EDWARDS et al. (1997), BECKER (1998), KALMA et al. (1998).		
	Balanço de calor	Em segmento de caule (SHB)	Aquecimento contínuo	4mm a 75mm	SADDLER & PITMAN (1970), SAKURATANI (1981), BAKER & VAN BAVEL (1987), SAKURATANI (1987), BAKER & NIEBER (1989), STEINBERG et al. (1989), DUGAS (1990), HAM & HEILMAN (1990), STEINBERG et al. (1990), GROOT & KING (1992), LASCANO et al. (1992), SHACKEL et al. (1992), DEVITT et al. (1993), SENOCK & HAM (1993), SWANSON (1994), GRIME et al. (1995b), ZHANG & KIRKHAM (1995), SMITH & ALLEN (1996), DUGAS et al. (1997), HERZOG et al. (1997), HLA et al. (1997), MAIER-MAERCKER (1997), GRIME & SINCLAIR (1999), SILVA et al. (2000).
			Aquecimento variável (HFC)	4mm a 63mm	KITANO & EGUCHI (1989), FICHTNER & SCHULZE (1990), ISHIDA et al. (1991), CHANDRA et al. (1994), WEIBEL & BOERSMA (1995), PERESSOTTI & HAM (1996), KJELGAARD et al. (1997), KUCERA et al. (1977), GRIME et al. (1995a), WEIBEL & BOERSMA (1995).
		Em setor de tronco (THB)	Aquecimento contínuo	> 20cm	CERMAK et al. (1973), CERMAK et al. (1976a), CERMAK et al. (1976b), CERMAK et al. (1980), CERMAK & KUCERA (1981), CERMAK et al. (1984), SWANSON (1994), SMITH & ALLEN (1996), HERZOG et al. (1997).
			Aquecimento variável	> 20cm	SCHULZE et al. (1985).
	Aquecimento randômico estacionário			VAN ZEE & SCHURER (1983).	
	Reserva de energia, placa de fluxo de calor		>51cm	DAUM (1967).	
	Dissipação térmica (HDP) (GRANIER, 1985)		40mm a 67mm	GRANIER (1985), SMITH & ALLEN (1996), LU (1997), CLEARWATER et al. (1999), NAVES-BARBIERO et al. (2000).	
	Termografia (qualitativo)		16 a 32cm	ANFODILLO et al. (1993).	
	Isótopos e tinta eletromagnético	isótopos	qualquer	WARING & ROBERTS (1979), KALMA et al. (1998).	
	Magnetohidrodinâmico	< 9mm	BEVIR (1970), SHERIFF (1972), KUCERA et al. (1977).		
	Ressonância magnética nuclear - Van As em 1982 (Van Zee & Schurer, 1983)	?			

HPV Heat Pulse Velocity – CHPV Compensation Heat Pulse Velocity - SHB Segment Heat Balance – THB Tissue Heat Balance – HDP Heat Dissipation Probe
HFC Heat Flux Control

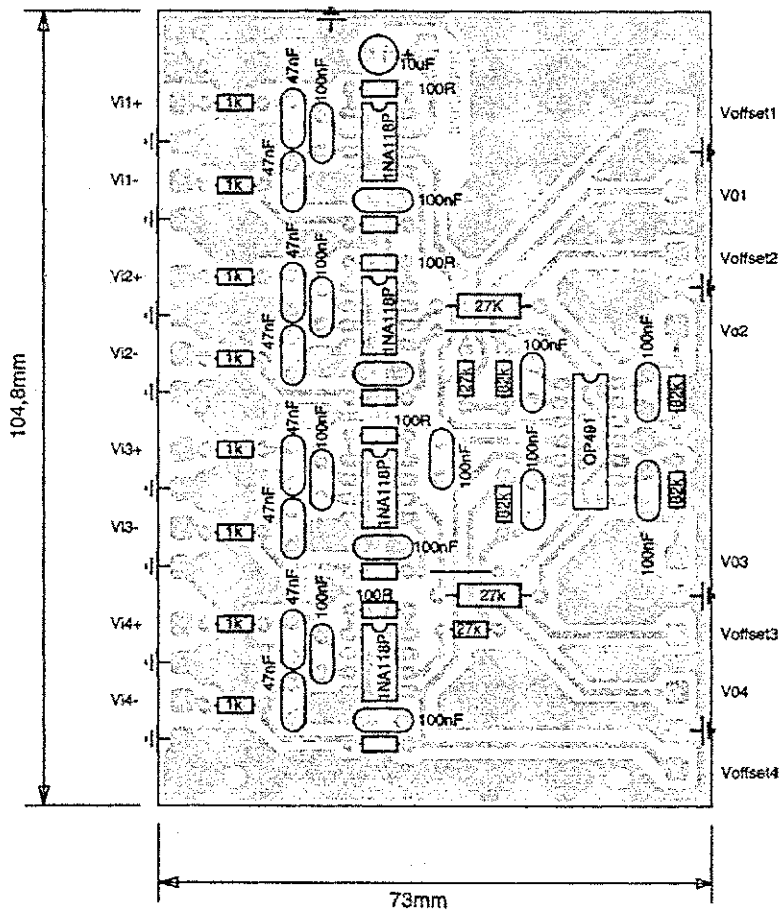
Apêndice B

Leiaute das placas de circuito impresso

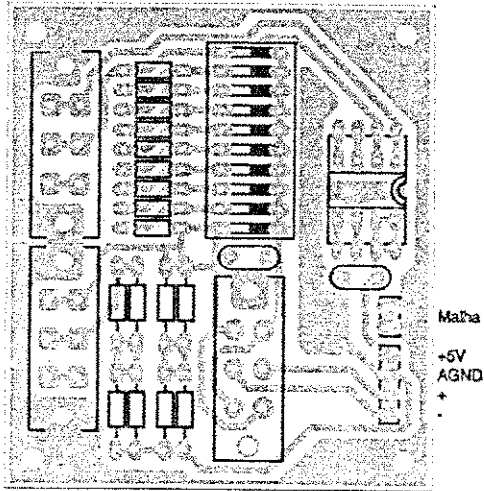
1. Amplificador de potência



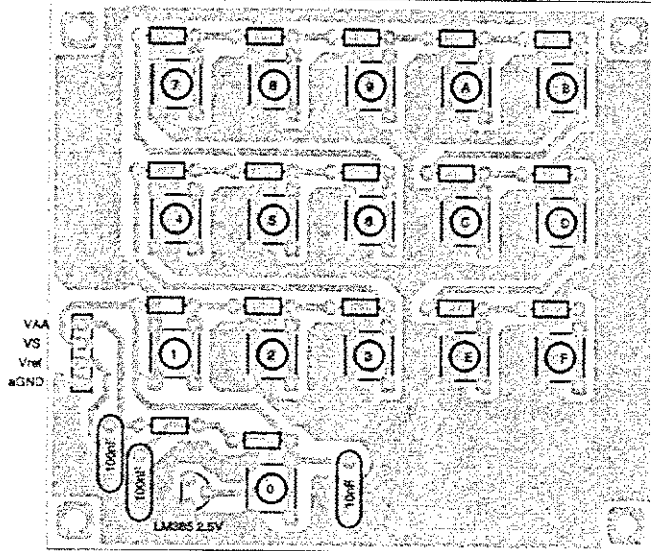
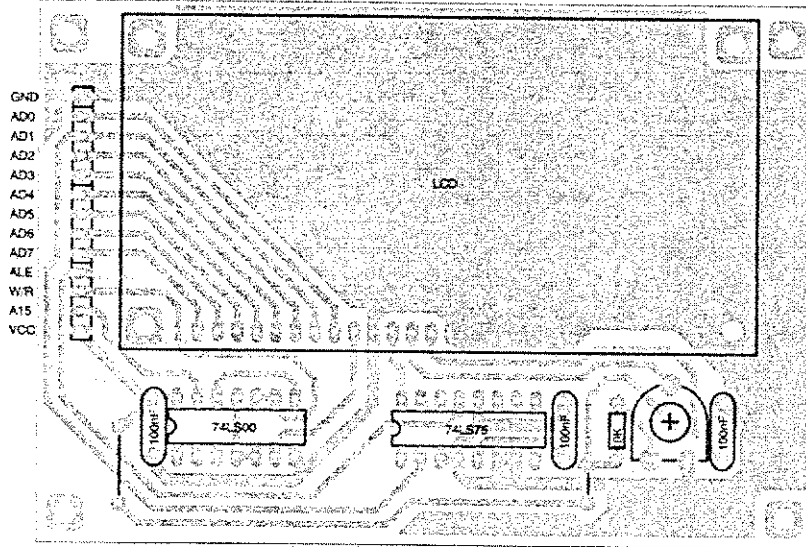
2. Amplificador de termopar



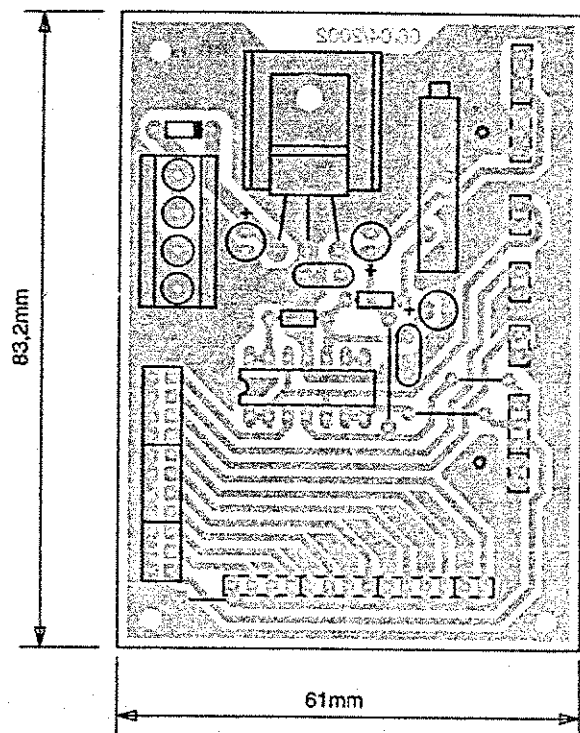
3. Fonte de tensão de microvolts



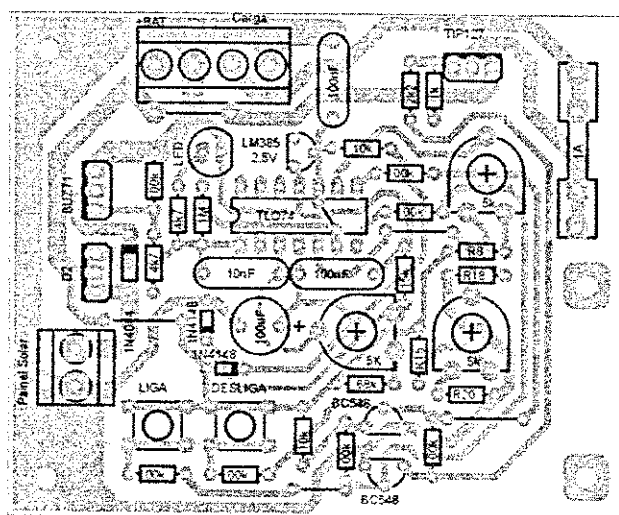
4. Display com teclado



5. Fonte de alimentação da parte analógica com deslocador de nível



6. Regulador de fonte com painel solar



7. Fonte de alimentação da parte digital, com relógio de 2 segundos.

