

**EVANDRO LUTERO ALVES**

**Desenvolvimento de um Sistema de  
Medição dos Fluxos de Transpiração  
Líquida para a Cultura de Cana-de-Açúcar  
a partir do Fluxo de Seiva**

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Evandro Lutero Alves e aprovada pela Comissão Julgadora em 30 de maio de 1999. Campinas, 10 de agosto de 1999.

*[Assinatura]*  
Presidente da Banca

**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
CAMPINAS - MAIO DE 1999**

**EVANDRO LUTERO ALVES**

**Desenvolvimento de um Sistema de  
Medição dos Fluxos de Transpiração  
Líquida para a Cultura de Cana-de-Açúcar  
a partir do Fluxo de Seiva**

**(Dissertação de mestrado em  
Engenharia Agrícola sob orientação  
do Prof. Dr. José Teixeira Filho)**

**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
CAMPINAS MAIO DE 1999**

UNIDADE BC  
CHAMADA: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
Ex. \_\_\_\_\_  
IMBO BC/ 39649  
DOC. 229199  
C  D   
RECO R\$ 11,00  
DATA 07-12-99  
CPD

CM-00137471-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

AL87d

Alves, Evandro Lutero

Desenvolvimento de um sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura de cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva. / Evandro Lutero Alves.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: José Teixeira Filho

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Hidrologia. 2. Plantas - Transpiração. 3. Cana-de-açúcar. I. Teixeira Filho, José. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| NOMENCLATURA.....  | I         |
| RESUMO.....  | II        |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVO .....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>9</b>  |
| 3.1. - MODELAÇÃO DOS FLUXOS HÍDRICOS.....  | 9         |
| 3.2. - TRANSPIRAÇÃO VEGETAL .....  | 11        |
| 3.2.1. <i>Determinação da evaporação e transpiração .....</i>                          | <i>13</i> |
| 3.2.2. <i>Método de pulso de calor.....</i>  | <i>16</i> |
| 3.2.2.1. <i>Conclusão.....</i>   | <i>20</i> |
| 3.2.3. <i>Método do balanço de energia com fluxo de calor constante .....</i>          | <i>20</i> |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODO .....</b>  | <b>29</b> |
| 4.1. DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA .....   | 29        |
| 4.2. DISPOSITIVO DE ISOLAÇÃO TÉRMICA .....   | 30        |
| 4.3. DISPOSITIVO DE AQUECIMENTO CONSTANTE.....   | 31        |
| 4.4. DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E ARMAZENAGEM DE DADOS<br>.....             | 32        |
| 4.5. ENSAIO EM LABORATÓRIO .....   | 33        |
| 4.6. ENSAIO EM EVAPOTRANSPIRÔMETRO.....  | 39        |
| <b>5. RESULTADOS.....</b>  | <b>42</b> |
| 5.1. DETERMINAÇÃO DE TENSÃO DO MÓDULO DE AQUECIMENTO E POSIÇÃO DOS<br>TERMOPARES ..... | 42        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.1.1. <i>Ajuste do sistema de medição dos fluxos de transpiração</i> .....                                   | 47        |
| 5.2. RESULTADOS DO ENSAIO NO EVAPOTRANSPIRÔMETRO .....  | 51        |
| <b>6. DISCUSSÕES</b> .....  | <b>58</b> |
| <b>7. CONCLUSÃO</b> .....   | <b>61</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....  | <b>63</b> |
| <b>ANEXOS</b> .....   | <b>1</b>  |
| ANEXO 1: ESTIMATIVA DA TENSÃO NECESSÁRIA PARA O SISTEMA DE<br>MEDIÇÃO DOS FLUXOS DE TRANSPIRAÇÃO LÍQUIDA..... | 1         |
| ANEXO 2: FOTOS DOS ENSAIOS.....   | 4         |

**NOMENCLATURA**

cm – centímetro

CO<sub>2</sub> – gás carbônico

°C – graus Celsius

g – grama

h – hora

J – Joule

KW – quiloWatts

m – metro

ml – mililitro

mm – milímetro

μΩ - microoHms

s- segundo

W – Watts

Ω - oHms

## RESUMO

Devido às necessidades de se medir a transpiração, no intuito de fazer estudo sobre o balanço hidrológico e a necessidade hídrica da cultura, este trabalho mostra o desenvolvimento de um Sistema de Medição do Fluxos de Transpiração Líquida para a Cultura de Cana-de-Açúcar a partir do Fluxo de Seiva, que possa ser aplicado de forma confiável e prática. Utilizou-se o método termoeletrico de fluxo de calor constante. O trabalho consiste na montagem de equipamentos para medir o fluxo de seiva através do método de balanço de energia com aquecimento constante. As medidas realizadas graças a estes equipamentos foram aferidas a um fluxo de água conhecido forçado a passar por segmentos de caule de cana-de-açúcar. Em seguida validou-se a correlação com comparação de medidas obtidas por evapotranspirômetros e com o Sistema de Medição do Fluxos de Transpiração Líquida para a Cultura de Cana-de-Açúcar a partir do Fluxo de Seiva. O valor das transpirações máximas medidas se aproximaram a 200g/h. O sistema apresentou uma boa sensibilidade nas variações dos fluxos de transpiração líquida acompanhando as variações ocorridas da radiação solar global.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor produtor de cana-de-açúcar, desde os tempos coloniais, apresenta uma importância substancial para o país, não somente como gerador de renda agrícola, mas também como agente definidor de fatores de produção, particularmente no uso das áreas agricultáveis.

As produções de açúcar e a de álcool constituem as duas principais atividades da indústria canavieira, ocupando os primeiros lugares, em termos de área colhida, e representando mais de 20% da área colhida do Estado de São Paulo.

O setor canavieiro observou uma forte ampliação após a crise energética de 1973, graças à necessidade de substituição das fontes tradicionais de energia, ampliando especialmente a produção de álcool hidratado carburante e criando condições para o desenvolvimento tecnológico do setor de produção, através da implantação do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), como estratégia para substituição. Essa expansão ocorreu principalmente nas regiões produtoras do Sudeste do país e notadamente no Estado de São Paulo.

Para a safra 1994/1995 o Estado apresentou uma produção de açúcar estimada em 78% da produção nacional (8.5 milhões de toneladas) e aproximadamente 6% da produção mundial (113.8 milhões de toneladas). A estimativa da produção de álcool, para a safra 1994/1995, da região paulista



contribuiu com 78% da produção nacional (11.1 milhões de m<sup>3</sup>), números esses que, por si só, refletem a importância da lavoura canavieira para o Estado de São Paulo.

Um dos aspectos mais importantes da produção da cana-de-açúcar traduz-se pela concentração de suas atividades e pela utilização de propriedades relativamente extensas em relação às outras culturas do Estado. Seu cultivo caracteriza-se por um elevado índice de concentração fundiária, predominantemente capitalista e uma forte homogeneidade produtiva, denotando pouca diferenciação na sua eficiência (PARANHOS, 1987). Sua produção de alto valor comercial apresenta uma organização, na qual a ocorrência da mão de obra assalariada de vínculo temporário é elevada, e a utilização de insumos modernos e de tecnologia é praticada em larga escala. O amplo emprego de insumos e de tecnologia intensifica-se com o aumento geográfico das propriedades, em relação às pequenas. Assim, os estratos maiores de propriedades são fortemente beneficiados por incentivos econômicos, como subsídios para a aquisição de fertilizantes e defensivos agrícolas, aumentando, desta maneira, o seu poder de competitividade em relação às propriedades menores (MANUEL, 1986). Esses aspectos produzem impactos ambientais e sócio-econômicos importantes nas regiões de produção e, em particular, sobre a qualidade dos recursos hídricos.

Especificamente sobre a bacia do rio Piracicaba, observou-se um aumento expressivo das áreas cultivadas por cana-de-açúcar nos últimos anos, principalmente na parte oeste da bacia. Essa cultura foi a que mais se expandiu na região, em virtude dos incentivos do PROALCOOL. Sua expansão foi também decorrente do aproveitamento de solos até então de menor aptidão agrícola (arenosos), em especial no setor oeste do município de Piracicaba e de Águas de São Pedro, que corresponde atualmente a 59% da área cultivada na bacia (Secretaria do Meio Ambiente, 1994).

Dentro dos objetivos de gestão e de proteção de recursos naturais em zonas cultivadas, a avaliação das disponibilidades hídricas ao longo do tempo representam um ponto fundamental para o estabelecimento de uma política de preservação e conservação dos recursos hídricos.

A utilização de modelos de simulação representa uma ferramenta fundamental para o estabelecimento do balanço hidrológico em bacias hidrográficas. Esses modelos são empregados para estimar possíveis impactos de modificações da superfície do solo sobre o meio ambiente, notadamente em áreas rurais. Diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos para simulação de bacias (SINGH, 1989). A escolha do modelo depende do objetivo, da precisão desejada, da disponibilidade e da qualidade de dados. Essa estrutura permite considerar a variabilidade da geomorfologia, as características do solo e da vegetação das bacias, propiciando a ligação mais adequada da modelização do

ciclo hidrológico com outros sistemas do meio ambiente, especialmente o sistema integrado solo-planta-atmosfera (BAND et al., 1993; WIGMOSTA et al., 1994).

A vegetação participa do ciclo hidrológico no controle da transpiração para a atmosfera, sendo um processo dominante nas relações água-planta. A evaporação da água na superfície das folhas produz um movimento da água no interior da planta (fluxo de seiva), a partir da absorção da água no solo pelas raízes.

A perda de água por evapotranspiração em uma bacia hidrográfica representa a parcela mais importante dentro do ciclo hidrológico. Essa parcela pode corresponder de 50% a 90% da precipitação em uma bacia hidrográfica. A transpiração vegetal contribui com a maior fração na evapotranspiração, podendo atingir valores superiores a 80% dentro do processo. A transpiração é a perda de água dos vegetais para a atmosfera na forma de vapor em resposta às condições ambientais locais. Essa perda é causada pelo gradiente de potencial hídrico entre a superfície de evaporação (vegetação) e a camada de ar adjacente.

A transpiração permite aos vegetais o controle de sua temperatura interna. Apenas uma pequena parte da água absorvida pelos vegetais é utilizada nas reações bioquímicas e para a manutenção da concentração de água nos tecidos. A maior parte da água absorvida é perdida por transpiração. O fluxo da água que atravessa a planta permite o transporte dos elementos minerais provenientes do solo até as células vegetais, os quais são essenciais à sobrevivência e ao

desenvolvimento vegetal. Desta maneira, a produção de matéria seca pode ser relacionada com a quantidade de água perdida por transpiração. Trabalhos realizados mostraram que a variação da produção de matéria seca de um vegetal aproxima-se de uma relação linear em função da transpiração relativa. A transpiração relativa é determinada pela relação entre a evapotranspiração efetiva e a evapotranspiração potencial. Na agricultura a estimativa da evapotranspiração é importante, também, para determinar as necessidades de água no desenvolvimento da cultura e por conseguinte o volume de água para a irrigação. Essa necessidade hídrica da cultura pode ser determinada pelo coeficiente de cultura.

Diversos métodos foram desenvolvidos para a medida da transpiração vegetal. Alguns dos métodos mostram-se operacionais e são largamente utilizados, como:

**Balanço hídrico** - a aplicação da equação do balanço hídrico em um volume de controle permite estimar o consumo de água de um vegetal a partir do conhecimento das entradas de água e da umidade do solo ao longo da profundidade. Esse método propicia a determinação da evapotranspiração com precisão em intervalo de tempo semanal ou mensal.

**Utilização de um traçador** - esse método consiste em introduzir um traçador no fluxo da seiva do vegetal e medir sua velocidade de deslocamento. O traçador pode ser constituído por uma substância corante ou uma substância

radioativa. Esse método apresenta grandes dificuldades no que concerne a aplicação em longos períodos de medida e sua precisão depende da avaliação da seção do fluxo da seiva. A utilização do traçador é freqüentemente destrutivo para o organismo vegetal e não pode ser aplicado em um número elevado de indivíduos simultaneamente.

**Lisímetros e evapotranspirômetros** - estruturas constituídas de um reservatório de solo providos de um instrumental de operação para medição volumétrica ou massiva dos fluxos de entrada e saída de água. As variáveis controladas junto ao lisímetro são: precipitação, escoamento, infiltração, armazenamento e percolação. Eles permitem estabelecer a evapotranspiração real e/ou potencial. Para determinação da evapotranspiração potencial ou máxima para uma cultura necessita-se de um dispositivo de alimentação contínua de água (evapotranspirômetros). A utilização desses dispositivos representa um dos procedimentos mais indicados para a determinação da transpiração vegetal.

**Utilização de métodos termoeletrônicos** - esse método consiste em medir a velocidade de fluxo da seiva através da introdução de uma fonte de calor junto ao fluxo. A liberação de calor é produzida por um sistema de resistências elétricas, as quais liberam uma quantidade de energia conhecida ao longo do tempo. O acompanhamento do desenvolvimento da energia dentro do fluxo de seiva permite a avaliação da velocidade do fluxo da seiva. Esse método pode ser dividido em três categorias: pulso de calor, balanço de energia e fluxo radial. A

medida do fluxo de seiva diretamente do vegetal permite a multiplicação de medidas para um número maior de indivíduos quando comparado com outros métodos. Os dispositivos são relativamente simples e podem ser conectados aos sistemas informatizados para aquisição e armazenamento das informações. As medidas do fluxo de seiva permite, também, uma maior compreensão dos mecanismos fisiológicos da água nos vegetais.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura de cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva baseado no método termoeletrico. O sistema será constituído por sensores de fluxo de seiva utilizando-se as técnicas de balanço de energia de aquecimento constante.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. - Modelação dos fluxos hídricos

A cobertura vegetal participa do ciclo hidrológico a partir do controle da transferência hídrica na interface vegetação-atmosfera. Essa componente do ciclo hidrológico, que se denomina evapotranspiração, representa uma parcela decisiva no estabelecimento dos balanços hídricos (STEWART, 1984; CALDER, 1977).

Entretanto, a evaporação da água na interface vegetação-atmosfera permanece como um dos aspectos menos conhecidos do ciclo hidrológico. A perda de água por evaporação vegetal se produz através dos estômatos (MORISON, 1987; JONES, 1992), os quais permitem a difusão do  $\text{CO}_2$  para os tecidos foliares, assim como limitam a perda de vapor de água para a atmosfera. A regularização das trocas de vapor de água e de  $\text{CO}_2$  representa o aspecto central dos estômatos (ZIMMERMANN, 1983). Os estômatos são controlados por mecanismos complexos que condicionam o fechamento ou a abertura estomática em resposta aos fatores fisiológicos e ambientais (SHARKEY & OGAWA, 1987; SCHULZE, 1994). Os principais fatores que controlam o fechamento e a abertura estomática são: radiação solar, déficit de pressão de saturação, temperatura, disponibilidades hídricas no solo (FARQUHAR & WONG, 1978; JARVIS & MORISON, 1981; FARQUHAR & COWAN, 1987;



JONES, 1992). Poucos estudos foram realizados relacionando os fatores fisiológicos e ambientais com os fluxos de água para a cultura de cana-de-açúcar em condições de campo. SANTOS FILHO (1984) realizou um estudo em casa de vegetação com três variedades, com a finalidade de determinar as variações do estado hídrico do vegetal, correlacionando o comportamento estomático, o potencial hídrico na folha, o crescimento e a temperatura foliar.

MACHADO (1981) desenvolveu um modelo matemático fisiológico simplificado para simular o acúmulo de matéria orgânica seca para a cultura de cana-de-açúcar.

Os estudos de transferência de fluxos de água podem ser efetuados em diferentes níveis de escalas, onde cada nível apresenta aspectos particulares. Esses estudos podem ser conduzidos em nível de folha, em nível de cobertura vegetal e em nível de bacia hidrográfica ou regional (JARVIS & McNAUGHTON, 1986). A mudança de escala dos processos em nível da folha à cobertura vegetal, para estimar o fluxo de transpiração do sistema planta-atmosfera, apresenta duas componentes principais: (a) a componente biológica, que leva em conta a arquitetura da cobertura vegetal e as características fisiológicas de cada espécie; (b) a componente da dinâmica de fluxo, que considera os gradientes das grandezas físicas em vários níveis (BRUTSAERT, 1984).

### 3.2. - Transpiração vegetal

A transpiração retira água do solo e a transmite à atmosfera por ação de transpiração das suas folhas (PINTO et. al., 1976), o que é também visto como perda de água para a atmosfera na forma de vapor, decorrente das ações físicas e fisiológicas dos vegetais, através dos estômatos (VILLELA & MATTOS, 1975).

A água passa através do solo, da planta para a atmosfera, em função da existência de um potencial hídrico e de uma continuidade hidráulica entre o solo e as folhas. A água é transportada pelo vegetal por uma rede formada de vasos, nos quais escoam o floema e o xilema. O floema distribui, a partir das folhas, uma solução concentrada e rica em substâncias nutritivas. O xilema assegura o transporte para as folhas de uma solução diluída proveniente do sistema radicular. A transpiração vegetal permite que as células foliares recebam os elementos e substâncias dissolvidos na água proveniente do solo. O motor responsável pela circulação da água nos vegetais é a energia de origem solar, a qual permite que a água líquida atinja as folhas, onde é perdida para a atmosfera sobre a forma de vapor.

A transpiração ocorre nas folhas através dos estômatos. Algumas plantas (milho e muitos capins) têm aproximadamente igual número de estômatos em cada face da folha. As folhas largas de árvores quase não têm estômatos na face

superior. O número de estômatos pode chegar a 20000 por cm<sup>2</sup>. A abertura e fechamento desses poros e por consequência a transpiração são controlados pelas células guardas. Durante o dia as células guardas, em uma folha bem provida de umidade, se intumescem e se separam (abertura do estômato). Este movimento expõe o interior úmido da planta à atmosfera exterior mais seca. À noite os estômatos normalmente se fecham (MOTA, 1987).

A taxa de transpiração é função dos estômatos, da profundidade da zona efetivas das raízes, do tipo de vegetação, do vento, da temperatura e umidade do ar e temperatura de superfície (VILLELA & MATTOS, 1975). PINTO et. al. (1976) diz que a luz, o calor e a maior umidade propiciam a abertura dos poros das folhas e influem diretamente sobre a transpiração, além das condições de umidade no solo. A natureza do solo, o seu grau de umidade e a posição do nível do lençol freático influenciam a umidade do solo na zona ocupada pelas raízes dos vegetais. Em geral a transpiração decresce com o aumento da tensão da umidade do solo (MOTA, 1987). A umidade do solo por sua vez está na dependência do regime das precipitações.

Todas as outras condições sendo as mesmas, a transpiração vegetal depende do tipo de planta, do seu estágio de desenvolvimento (idade vegetal) e do desenvolvimento das suas folhas (PINTO et. al., 1976).

Se a transpiração excede a absorção de água, então o balanço hídrico da planta torna-se negativo. Em tais condições as plantas tendem a evitar a

intensificação desse desequilíbrio através da procura de água pela expansão do sistema radicular, ou aumento de sua força de sucção para obter com mais firmeza a água retida no solo. Outras reações da planta para contornar uma transpiração excessiva são a queda das folhas, fechamento dos estômatos e secamento incipiente das membranas da célula. Quando estas últimas situações ocorrerem, o crescimento fica restringido (MOTA, 1987).

Durante períodos de alta radiação e baixa umidade, mesmo aquelas plantas crescendo em solos próximos da capacidade de campo, podem estar sujeitas à severa carência de água. O fenômeno conhecido como “depressão do meio-dia” ou “déficit de água do meio-dia” é um bom exemplo (MOTA, 1987).

### **3.2.1. Determinação da evaporação e transpiração**

VILLELA & MATTOS (1975) afirmam que existem muitos estudos que têm como objetivo a determinação da taxa de evapotranspiração. Esses estudos geralmente são dirigidos em dois sentidos: um, visando a elaboração de aparelhos e métodos de medidas cada vez mais precisos; o outro, visando a elaboração de fórmulas teórico-empíricas que procuram uma melhor aproximação das condições reais.

Para obtenção da taxa de evapotranspiração, os métodos podem ser agrupados em três categorias:

- Aqueles que se utilizam de medidas diretas (Fluxatron e Evaporation);
- Aqueles que se utilizam de medidas indiretas, como a pesquisa de um parâmetro no solo (evapotranspirômetros, lisímetros, moderação de nêutrons, medida de fluxo de seiva etc.);
- Aqueles que se baseiam em fórmulas teórico-empíricas (difusão do vapor, balanço de energia etc.).

Em relação à transpiração diversos métodos foram desenvolvidos (PARKER, 1957; DECKER & WETZEL, 1957; DECKER et al., 1962; OWSTON et al., 1972; KLINE et al., 1970; SHERIFF, 1972; SWANSON & LEE, 1966; STEWART, 1984; CASPARI et al., 1993).

Em especial, o método termoeletrico é atualmente um dos mais empregados, por sua facilidade de instalação e baixo custo envolvido. Essa técnica de medida de fluxo foi desenvolvida para estudos de circulação sanguínea humana, por HUBER (1932), citado por MARSHALL (1958). HUBER & SCHIMIDT (1937), citados por HUMPHRIES & GIFFORD (1984), aplicaram esta técnica aos vegetais.

É estimado que menos de 1% da água que passa pela planta é aproveitada na fotossíntese, portanto o restante da água que passa pela haste ou tronco é transpirada pela planta (MOTA, 1987).

Diversos autores utilizaram o método termoeletrico para a determinação do fluxo de seiva nos vegetais, relacionando-o às condições climáticas (CLOSS, 1958; GIFFORD, 1968; SHAW & GIFFORD, 1975; BALEK & PAVLIK, 1977; COHEN et al., 1981; HUMPHRIES & GIFFORD, 1984; GRANIER, 1985; COHEN & FUCHS, 1989; TEIXEIRA FILHO, 1995). Essa técnica pode ser dividida em três métodos: pulso de calor, balanço de energia e fluxometria radial. O método do balanço de energia procura estimar o fluxo de seiva através do balanço de calor perdido e transportado no caule dos vegetais, a partir de uma quantidade constante ou variável de calor fornecida. SAKURATANI (1981, 1984) e SAKURATANI & ABE (1985) empregaram esse método em vegetais com diâmetros de caule variando entre 0,5 e 3,0 cm, como: girassol e algodão. BACKER & VAN BAVEL (1987), DUGAS et al. (1991, 1992) e STEINBERG et al. (1989, 1990a, 1990b) aplicaram esse método do balanço de energia em várias espécies com diâmetros de caules de 3,5 a 7,9 cm. O método de medida da transpiração é indicado para espécies de pequenos diâmetros de troncos e caules.

### **3.2.2. Método de pulso de calor**

O princípio do método do pulso de calor procura estabelecer a velocidade de deslocamento da seiva em função da velocidade do deslocamento de uma

onda de calor ao longo do caule. Um dispositivo emite um breve pulso de calor dentro dos tecidos condutores de seiva. A partir da medida do tempo necessário para atingir um ponto situado a jusante da emissão pode-se determinar a velocidade do fluxo de seiva (MARSHALL, 1958; CLOSS, 1958). Para calcular o fluxo total de seiva é obrigatório o conhecimento da superfície total de transporte de seiva. Diversos autores utilizaram essa técnica para avaliação dos fluxos de transpiração em várias espécies (SWANSON, 1972; LASSOIE et al., 1977; EDUARDES & WARWICK, 1984; COHEN & FUCHS, 1989).

A técnica de velocidade de pulso de calor foi desenvolvida por HUBER (1936, citado em BARRET et al. 1995) como um método de medida de velocidade de seiva em hastes de planta. É uma técnica conveniente para medir consumo de água em plantas altas sem alterar o micro-ambiente da copa (BARRET et al., 1995). O método de pulso de calor, baseado na solução de equação de fluxo de calor convectivo em meios homogêneos, pode ser usado para determinar velocidade de calor nas hastes das plantas (COHEN & FUCHS, 1989).

O objetivo do estudo de COHEM et al. (1988) foi desenvolver e testar a técnica de medida de fluxo de seiva na haste do algodoeiro pelo método de pulso de calor.

Quando um pulso de calor é produzido por um aquecedor inserido dentro do tecido do xilema da planta, o movimento do pulso de calor é determinado por

condução de calor através da madeira e por convecção forçada de pulso de calor pelo movimento da seiva (CLOSS, 1958 & MARSHALL, 1958 citados por BARRET et al., 1995).

Velocidade do pulso de calor,  $V_h$ , é inversamente proporcional ao tempo ( $t_e$ ) obtido para a temperatura diferencial entre dois sensores retornar a zero. Um sensor colocado a uma distância  $x_1$  (m) acima e o outro colocado a uma distância  $x_2$  (m) abaixo da fonte de calor (CLOSS, 1958 citado por BARRET et al.).

$$V_h = (x_1 + x_2)/2.t_e \quad [ 1 ]$$

Entretanto, a convecção do pulso de calor é perturbada pela presença do aquecedor e do sensor de temperatura, e pelo rompimento do tecido do xilema associado com sua localização. Consequentemente, a velocidade de pulso de calor deve ser corrigida pelo ferimento:

$$V_h' = a + b.V_h + c.V_h^2 \quad [ 2 ]$$

Onde  $V_h'$  é a velocidade de pulso de calor correta (m/s).

BARRET et al. (1995) utilizou esta técnica para medir fluxo de seiva em florestas tropicais e em florestas de eucalipto de espécies do sudeste da Austrália. E em troncos de madeira por COHEN & FUCHS (1989).



O método do pulso de calor pode mostrar realmente medidas de consumo de água pelo algodoeiro (COHEM et al., 1988).

No trabalho de BARRET et al. (1995) a técnica não estimou exatamente as taxas de fluxos de seiva, ficando abaixo de um mínimo esperado inicialmente. Isto pode ter sido resultado, em parte, pela medida imprecisa de  $t_e$  (equação 1) para baixas velocidades do fluxo de seiva durante a noite e de manhã cedo. Então, estimativas de velocidade de fluxo de seiva por esta técnica são mais fiéis para fluxo elevado (BARRET et al., 1995).

Estudos em troncos de madeira mostraram que os métodos de pulso de calor subestimam a velocidade da seiva em torno de 45%. (COHEN & FUCHS, 1989). A subestimação mostrou-se dependente das espécies. O fator de calibração de palmeiras é diferente das achadas para outros tipos de árvores (COHEN & FUCHS, 1989).

Em plantas herbáceas, a calibração é derivada de medidas em série de plantas com diferentes áreas de seções transversais. O fator de calibração é uma função das propriedades das hastes, que variam entre espécies (COHEN & FUCHS, 1989).

Heterogeneidade, por condições de campo ou causada pela implantação de sensores em tecidos condutores, resulta em medidas de velocidades de calor que são sempre inferiores às reais (COHEN & FUCHS, 1989).

Um exemplo de relação entre as taxas de transpiração e a velocidade de calor convectivo em hastes da planta de algodão, com diferentes áreas de secção transversal, em dados coletados de manhã cedo até o meio dia apresentaram em todas um crescimento linear. Entretanto, cada haste mostra uma variação da taxa de transpiração diferente (COHEN & FUCHS, 1989)..

Em contraste com a relação linear achada para o algodão, soja e milho, a medida da velocidade de calor convectivo para plantas de tomates não é proporcional para a taxa de transpiração. A curva sugere que o número de elementos condutores na haste diminui com o aumento do fluxo transpiracional (COHEN & FUCHS, 1989).

Um procedimento de correção consiste em medir a taxa de variação de temperatura depois da emissão de calor, ajustando-se as medidas subsequentes a partir de uma variação linear (COHEM et al., 1988).

### **3.2.2.1. Conclusão**

Dificuldades no método de pulso de calor em estimar exatamente a área de condução do fluxo levaram a utilizar a técnica de balanço de energia na haste,

que obtém uma medida direta de taxas de fluxos de massa de água (CHANDRA et al., 1994).

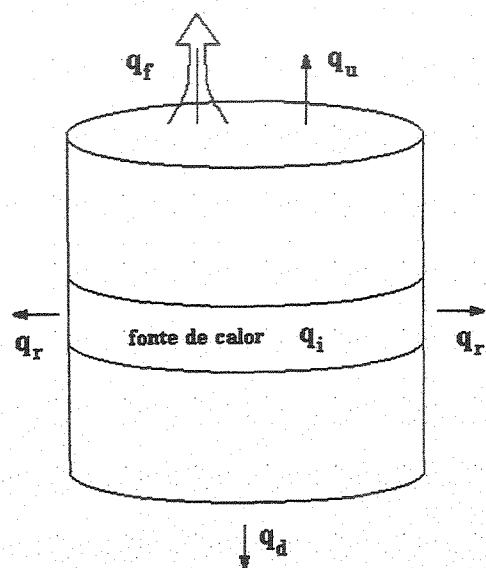
### **3.2.3. Método do balanço de energia com fluxo de calor constante**

A utilização da técnica de fluxo de calor constante foi primeiramente implantada por SAKURATANI (1981, 1984), e tem sido aplicada em vários outros estudos (STEINBERG, VAN BAVEL & McFARLAND, 1989 e 1990b; HAM & HEILMAN 1990; STEINBERG, McFARLAND & WORTHINGTON 1990a). Esta técnica apresenta o conceito de balanço de energia sobre um volume de controle, o qual é definido por uma seção do caule do vegetal (CHANDRA et al., 1994).

Os dispositivos desenvolvidos consistem de uma fonte de calor, constituída por uma resistência elétrica em forma de cinta, podendo, assim, envolver adequadamente uma seção do caule do vegetal. A resistência deve ter uma resistividade constante para se obter uma faixa de temperatura adequada de trabalho, a fim de fornecer um fluxo de calor constante para uma dada intensidade de corrente elétrica. A faixa de temperatura adequada é aquela que não prejudica a fisiologia da planta e seus metabolismos.

Tanto a seção do caule como a resistência estão envolvidas por um isolante, que se estende para baixo e para cima da seção do volume de controle, minimizando, assim, as perdas de calor por condução radial para o meio exterior (CHANDRA et al., 1994).

Para estimar o balanço de calor no volume de controle é necessário se obter as temperaturas em alguns pontos deste volume, portanto se faz necessário a utilização de termopares que são fixados nos pontos de interesse para se obter os



**Figura 1 – Seção do caule**

dados de temperatura. Esses pares de termopares são separados por uma distância conhecida fornecendo o gradiente de temperatura entre alguns pontos determinados (CHANDRA et al., 1994).

SENOCK & HAM (1993) definem resumidamente, o método de balanço de energia através do conceito de balanço de energia considerando-se o fluxo de calor

dentro de um segmento isolado da seção do caule do vegetal. O balanço de energia na seção do caule (figura 1) do vegetal aquecida pode ser escrito como:

$$q_i = q_s + q_u + q_d + q_r + S$$

[ 3 ]

onde:  $q_i$  - quantidade de calor fornecida dentro do volume de controle;  $q_u$  - quantidade de calor transferida do volume de controle por condução axial ao longo da haste em direção ascendente;  $q_d$  - quantidade de calor transferida do volume de controle por condução axial ao longo da haste em direção descendente;  $q_r$  - quantidade de calor transferida do volume de controle por condução radial através do isolante;  $q_s$  - quantidade de calor transferida do volume de controle por convecção através do fluxo de seiva e  $S$  - variação do armazenamento de energia no segmento da haste.

A variação do armazenamento de energia na seção do caule pode ser considerada nula (Senock & Ham, 1993; CHANDRA et al., 1994) :

$$q_i = q_s + q_u + q_d + q_r \quad [ 4 ]$$

A quantidade de calor transferida do volume de controle por convecção através do fluxo de seiva ( $q_s$ ) pode ser escrito por:

$$q_s = m.c.(T_u - T_d) \quad [ 5 ]$$

onde:  $m$  - fluxo de massa de seiva;  $T_u$  - temperatura da haste medida acima da seção aquecida;  $T_d$  - temperatura da haste medida abaixo da seção aquecida e  $c$  - calor específico da água;

Substituindo-se a equação [5] pela equação [4] e considerando-se que o calor específico da seiva é igual ao calor específico da água, tem-se:

$$m=(q_i-q_u-q_d-q_r)/[c.(T_u-T_d)] \quad [6]$$

A quantidade de calor transferida do volume de controle por condução radial através do isolante ( $q_r$ ) pode ser determinada quando o fluxo de seiva é considerado nulo ( $m=0$ ). Assim:

$$q_r=q_i-q_u-q_d \quad [7]$$

O termo  $q_r$  pode ser escrito:

$$q_r=k_g/(T_i-T_e) \quad [8]$$

onde:  $T_i$  - temperatura interna do isolante;  $T_e$  - temperatura externa do isolante e  $k_g$  - condutância do aparelho.

As taxas de fluxo de seiva próximas a zero podem ser obtidas em horários noturnos (STEINBERG et al. 1989; BACKER & VAN BAVEL, 1987). Cada dispositivo de medida necessita de calibração individual para obter-se o valor da condutância do isolante (STEINBERG, et al. 1989).

STEINBERG et al. (1989) adaptaram esse dispositivo de medida de fluxo de seiva em caules de plantas herbáceas de diâmetros de grande dimensão e árvores. STEINBERG et al. (1990b) mediram, também, a taxa de fluxo de seiva no tronco, nos galhos e nas hastes das folhas de uma árvore de pecan (*Carya illinoensis* 'Wichita') com cinco anos.

A forma de construção de dispositivos para medida de fluxo de calor pode variar de estudo para estudo, citado-se como exemplo o trabalho de PERESSOTTI & HAM (1996). Os autores construíram e testaram um dispositivo de medida de fluxo de calor constituído de aquecedor duplo em caule de milho com hastes entre 25mm e 30mm de diâmetro. Este dispositivo foi comparado com um dispositivo de medida de fluxo de calor constituído de aquecedor simples.

Como o objetivo de verificar a performance dos dispositivos de medida de fluxo de calor são utilizados outros métodos para a medida de transpiração a fim de se fazer uma comparação. SENOCK & HAM (1993) fizeram uma comparação entre métodos em laboratório e estufas, para muda de soja com

diâmetros menores que 5mm. Os autores, utilizando um dispositivo para a medida de fluxo de calor, encontraram valores de transpiração constantemente menores que 5% quando comparados com métodos de medidas gravimétricas.

STEINBERG et al. (1989) acharam resultados satisfatórios de transpiração numa estufa experimental com uma pequena árvore (árvore madeireira não especificada pelo autor). A taxa de fluxo de seiva encontrada pelo dispositivo de medida foi comparada com a taxa de transpiração, apresentando uma diferença de 4% para períodos de 24 horas ou mais.

O intervalo de integração pode variar, entre as medidas de transpiração feitas por diferentes métodos para a comparação entre si. STEINBERG et al. (1989) trabalhou com intervalos de 24 horas ou maior e STEINBERG et al (1990b) trabalhou com intervalos de 24 horas.

ZHANG & KIRKHAM (1991) encontraram erros da ordem de 8,8% para o fluxo de seiva do girassol, quando comparados com métodos gravimétricos. SAKURATANI (1981) e BAKER & VAN BAVEL (1987) sugerem que erros até 10% são aceitáveis para estimativa de perda de água em plantas herbáceas.

ZHANG & KIRKHAM (1991) encontraram para o sorgo um erro de 7,6% aproximadamente.

PERESSOTTI & HAM (1996) compararam dois métodos de sistemas de aquecimento individual e duplo. A transpiração obtida pelo método de fluxo de seiva foi comparada com a obtida pelo método gravimétrico. Os autores



observaram, período de cinco dias, um erro de 4% e 9,5% para o sistema duplo e simples respectivamente. No que concerne às medidas horárias, os dois sistemas apresentaram um erro de 10% em relação ao método gravimétrico. Os dispositivos mediram com sucesso a taxa do fluxo de seiva de 0 até 140g/h e o consumo de água diário de 137 até 1064g/dia, equivalente para fluxos observados em milho maduro sobre condições de campo.

STEINBERG et al. (1990b), em condições de campo sob uma demanda de evaporação alta, encontrou uma precisão de 8% para o método. O método de medida de fluxo de seiva em um tronco foi comparado com a perda de água da planta medida por um lisímetro para um período de 24h.

Para os cálculos de perda de calor por condução radial é necessária a determinação dos valores de condutividade térmica da madeira e da área da seção transversal da haste. Esses valores são função da porosidade da madeira e umidade interna. Portanto, torna-se necessária uma colocação precisa dos termopares, para que os gradientes de temperatura sejam relacionados com os fluxos de transpiração (STEINBERG, et al. 1989).

Outro fator importante, ligado com a precisão da medida de fluxo de seiva, está relacionado com o aquecimento externo da haste provocado pela radiação solar direta (COHEN et al.,1993). Outra desvantagem do método do balanço de energia com fluxo de calor constante deve-se ao aumento de temperatura na haste, o qual pode ser prejudicial ao vegetal. Esse aumento de temperatura é

encontrado em condições de baixos fluxos de seiva, proporcionando, assim, uma diminuição do fluxo de calor por convecção ao longo da haste (HAM & HEILMAN, 1990). A elevação da temperatura, também, poderá intensificar a perda de calor por condução radial, a qual em algumas condições poderá atingir a mesma ordem de grandeza dos fluxos de calor por convecção (HAM & HEILMAN, 1990). Essas condições prejudicam a precisão do método.

SHACKEL et al. (1992) verificaram que para taxas elevadas de fluxo de seiva, os gradientes de temperatura tornam-se muito pequenos. Nessas condições a precisão das medidas dos gradientes de temperatura são fundamentais para a confiabilidade das medidas de fluxo de seiva.

O método de balanço de energia tem sua precisão insatisfatória para taxas de transpiração superiores a 100g/h (COHEN et al., 1993). Os autores, para altas taxas de transpiração, encontraram valores subestimados que em certos casos ultrapassaram 20% de erro. COHEN et al. (1993) afirmam, ainda, que para taxas de transpiração acima de 100g/h o método de balanço de energia com fluxo de calor constante tem sua precisão insatisfatória. Foi verificado o mesmo problema por SHACKEL et al. (1992), o qual foi provocado por baixos valores de gradientes de temperatura.

Discrepâncias encontradas no método, também, podem ser causadas pela mudança no sistema hidráulico da planta ou pelo mal contato entre o aparelho e a haste da planta. Esse mal contato é provocado pelo encolhimento e inchamento

da haste durante o ciclo de estresse. Para períodos noturnos, o fluxo de seiva medido pelo método apresentou-se sempre um pouco maior em relação às estimativas do método gravimétrico. Esta discrepância foi atribuída à reidratação da planta durante o período noturno e por um possível gradiente de temperatura apresentado mesmo para um pequeno fornecimento de calor.

STEINBERG et al. (1989) afirmam que para períodos pequenos (menores que 4 horas) a comparação entre métodos é menos precisa. Erros de medidas de perda de água diário do girassol foram de 20,2%, entretanto, sendo positivos na primeira parte do dia (61,4% entre 7:00h e 13:25h) e negativo na última parte do dia (-80,5% entre 13:50h e 18:00h) (ZHANG & KIRKHAM, 1991). COHEN et al. (1993) sugerem que deve-se ser estudada cuidadosamente cada espécie para as variáveis condições ambientais.

## 4. MATERIAL E MÉTODO

O trabalho foi realizado no laboratório de Hidrologia (com o apoio do Laboratório de Hidráulica) do Departamento de Água e Solo da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

A variedade de cana-de-açúcar analisada é NA72 454, uma das variedades mais difundidas na região.

O sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura de cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva é basicamente formado pelos seguintes elementos:

- Dispositivo de alimentação elétrica;
- Dispositivo de isolamento térmica;
- Dispositivo de aquecimento constante;
- Dispositivo de medição de temperatura e armazenagem de dados.

### 4.1. Dispositivo de Alimentação Elétrica

O dispositivo de alimentação elétrica tem como finalidade alimentar a resistência elétrica para o dispositivo de aquecimento constante, de tal modo a

fornecer ao longo dos ensaios a energia requerida sem interrupção de forma constante. Este dispositivo é formado por uma fonte elétrica que transforma a corrente alternada de 127 Volts da rede em corrente contínua com tensão variada, possuindo 6 saídas de diferentes tensões. A estimativa inicial da faixa de tensão necessária para a construção da fonte está descrita no anexo 1. A fonte foi construída de forma a garantir uma tensão constante na saída, o esquema da fonte pode ser visto no anexo 1.

#### **4.2. Dispositivo de Isolação Térmica**

Para que o sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida, a partir do fluxo de seiva, possa funcionar corretamente, é necessário minimizar as influências externas. Para isto, houve a necessidade de envolver o sistema de aquecimento e o caule da planta com uma isolação térmica. A isolação térmica utilizada foi de AF/Armaflex por ser flexível e por moldar-se às diversas formas e diâmetros. O isolamento térmico ao longo do comprimento do caule da planta tinha como objetivo minimizar perdas de calor, não só no sentido radial mas, também, no sentido longitudinal. No trabalho procurou-se um comprimento que cobrisse os nós inferior e superior do segmento, no qual era montado o sistema de medição de fluxo de transpiração líquida.

### 4.3. Dispositivo de Aquecimento Constante

O dispositivo de aquecimento constante é formado basicamente por uma resistência elétrica. Esta resistência foi construída utilizando-se fio de níquel-cromo. A resistividade ( $R_o$ ) do fio é de  $104\mu\Omega.cm$  que é praticamente constante para a faixa de temperatura trabalhada, pois o coeficiente ( $\alpha$ ) de temperatura é de  $0,00004/^\circ C$ . Para se determinar a resistividade ( $R_T$ , em  $\mu\Omega.cm$ ) em função da temperatura ( $T$ , em  $^\circ C$ ), pode-se utilizar a equação 9.

$$R_T = R_o + \alpha.R_o.T \quad [9]$$

O fio utilizado tinha diâmetro de 0,5mm e o comprimento foi determinado seguindo uma analogia com o trabalho de PERESSOTTI & HAM (1996). Estes autores utilizaram uma resistência em forma de uma fita retangular, cuja as dimensões eram de 15cm de comprimento e 9cm de altura. Como o perímetro, aproximado, da cana-de-açúcar é de 10cm que é o comprimento necessário para a resistência, mantendo a proporcionalidade do trabalho de PERESSOTTI & HAM (1996) determina-se a altura para a resistência de 6cm. Para que o fio fosse moldado de acordo com a figura 2 e figura 26 no anexo 2, foi necessário utilizar um comprimento de 1,5m (resistência igual  $7,945\Omega$ ). O formato da

resistência permite que o comprimento da resistência possa variar, adaptando-se a uma planta com perímetro maior ou menor que 10cm.

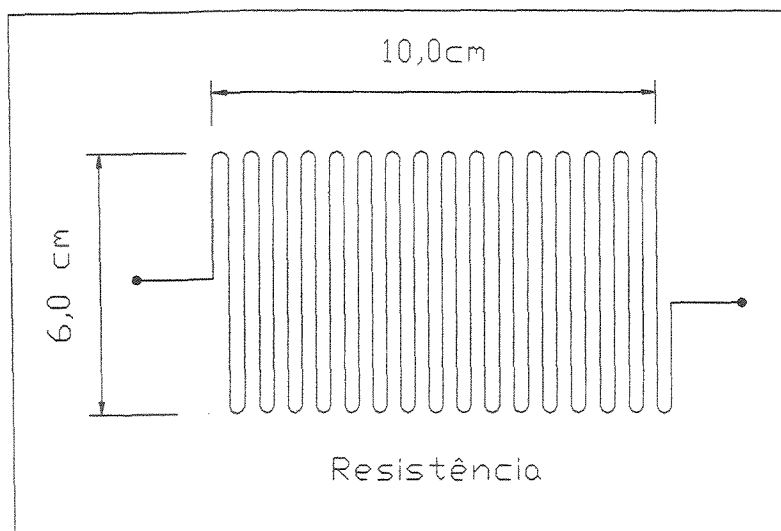


Figura 2 – Dispositivo de aquecimento

Em função da proposta da construção do dispositivo de aquecimento é provável que algumas partes da resistência apresentem contato. Portanto, para que este efeito não provoque uma redução da resistência foi utilizado sobre o fio um verniz isolante.

#### **4.4. Dispositivo de Medição de Temperatura e Armazenagem de Dados**

A medida das temperaturas foi feita através de termopares introduzidos no caule da planta. A parte que era introduzida na planta consistia do segmento do termopar, ou seja, a parte soldada com 0,5mm de comprimento. Em volta do

local, onde houve a inserção do termopar, aplicou-se um adesivo vedante à base de borracha de silicone para, principalmente, evitar a saída de água do segmento de caule que era testado. Esse adesivo propicia uma melhor fixação do termopar na planta, evitando que durante os ensaios, por qualquer manipulação, houvesse deslocamento do termopar em relação à planta. A força eletromotriz gerada pelos termopares, que apresenta valores da ordem de miliVolts, é lida e armazenada pelo “datalogger”. O “datalogger” utilizado, nos ensaios de laboratório e no campo experimental, foi o “21X MICROLOGGER” da “CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.”.

Os termopares utilizados foram construídos com o par de fios de cobre-constantan (tipo T) de 0,5mm de diâmetro com isolação PVC-PVC. Esses termopares foram calibrados a partir de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) medidas por termômetros. Os termômetro utilizado tinha escala de  $10^{\circ}\text{C}$  negativos até  $110^{\circ}\text{C}$  positivos com graduação de  $1^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.5. Ensaio em Laboratório**

O ensaio consiste em promover a passagem forçada de um fluxo de água conhecido através do segmentos do caule de cana-de-açúcar, comparando-o com as diferenças de temperatura.



Assim, realizou-se uma correlação entre os resultados do sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida e o fluxo de água forçada.

A fase preliminar dos experimentos foi realizada no Laboratório de Hidráulica. Segmentos de caule de cana-de-açúcar (variedade NA72 454) foram coletados em diferentes estágios de desenvolvimento. Os segmentos foram coletados de forma a tentar retardar ao máximo a sua deterioração. Antes do corte da planta, promovia-se regas para saturação do solo e a montagem do sistema de medição (resistência e termopar). O corte do caule era realizado o mais próximo ao solo e, em seguida, colocado em um recipiente contendo água, por onde era transportada até o laboratório. No laboratório os segmentos eram preparados nos tamanhos adequados para a montagem do ensaio.

Para efetuar o ensaio foi necessária a construção de um sistema que forçasse a passagem da água através do segmento do caule de cana-de-açúcar.

O sistema foi constituído a partir de uma caixa d'água, um registro, mangueiras, um quitassato e uma bomba de vácuo. Para medir a vazão utilizou-se uma balança de precisão (precisão de 0,01g) e um conjunto de células de carga (precisão de 0,01g).

O ensaio em laboratório foi dividido em duas fases. Na primeira fase determinou-se a posição dos pontos para a tomada de temperatura e na segunda fase ajustou-se o sistema de medição de fluxo de transpiração líquida proposto. A montagem da primeira fase pode ser vista na figura 3 e figura 29 (anexo 2).

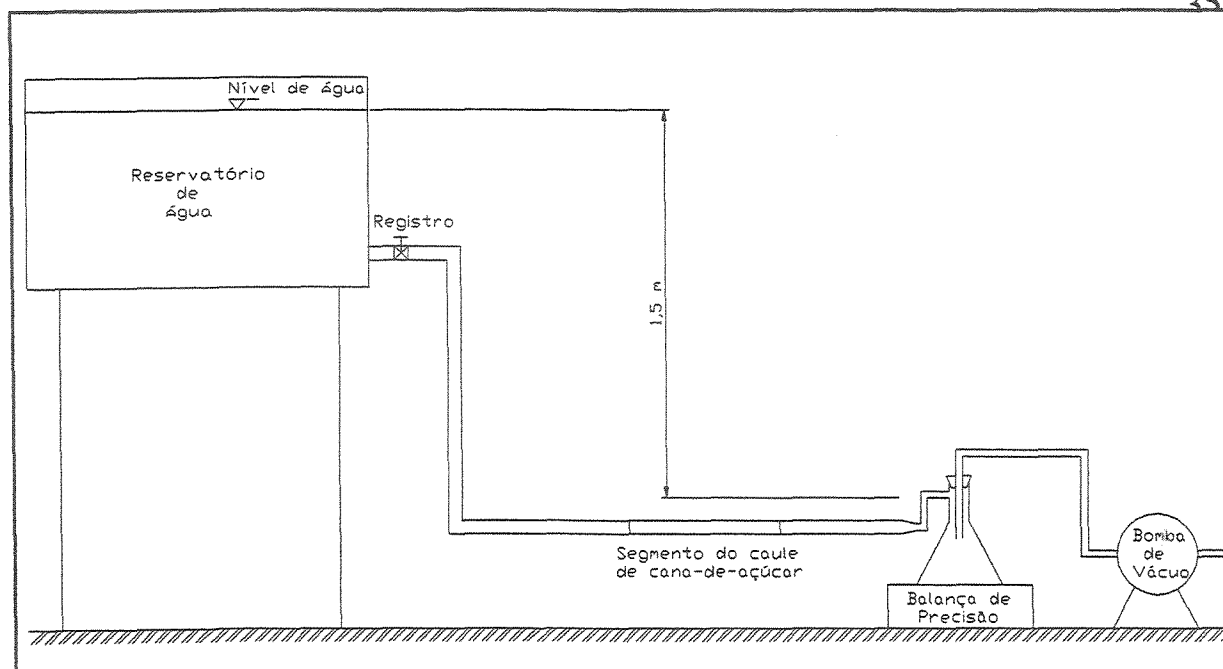


Figura 3 – Ensaio com balança de precisão

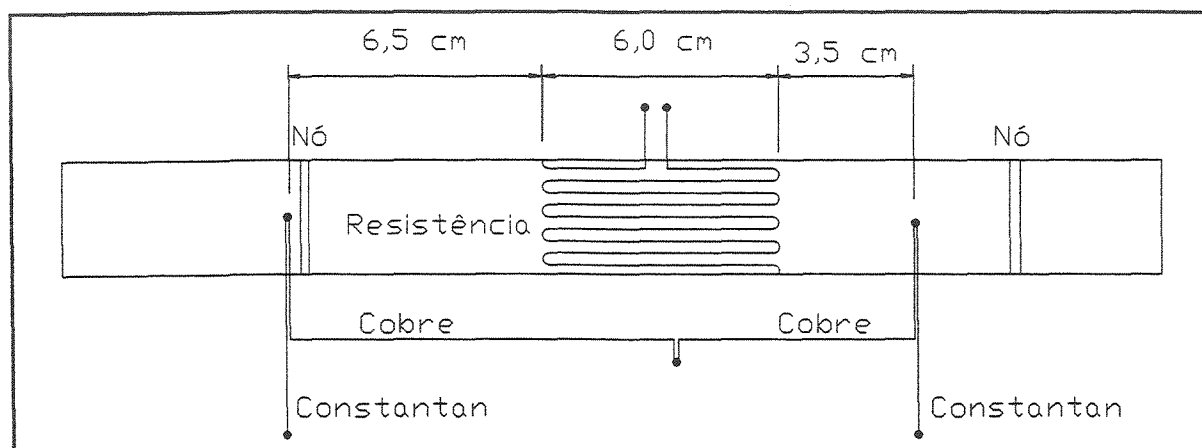


Figura 4 – Montagem do sistema de medição de fluxo de transpiração líquida com um termopar a montante e outro a jusante da resistência

Com o esquema de montagem da figura 3, inicialmente adotou-se uma configuração para posicionamentos de medição das temperaturas (figura4).

A configuração inicial foi inspirada a partir de alguns estudos na literatura, os quais indicam a colocação de um termopar a montante e de outro a jusante da resistência.

Entretanto uma outra configuração foi testada a partir de uma montagem com diferentes posições para tomada de temperatura (figura 5). O teste tem como objetivo a determinação da melhor posição de fixação dos termopares em relação à resistência de aquecimento.

No teste optou-se pela colocação de cinco termopares em posições diferentes, dois termopares a jusante da resistência (um próximo e o outro um pouco mais distante da resistência). O terceiro termopar colocou-se no meio da resistência enquanto que o quarto termopar posicionou-se a montante próximo à resistência. O quinto e último termopar fixou-se mais distante a montante da resistência (figura 5).

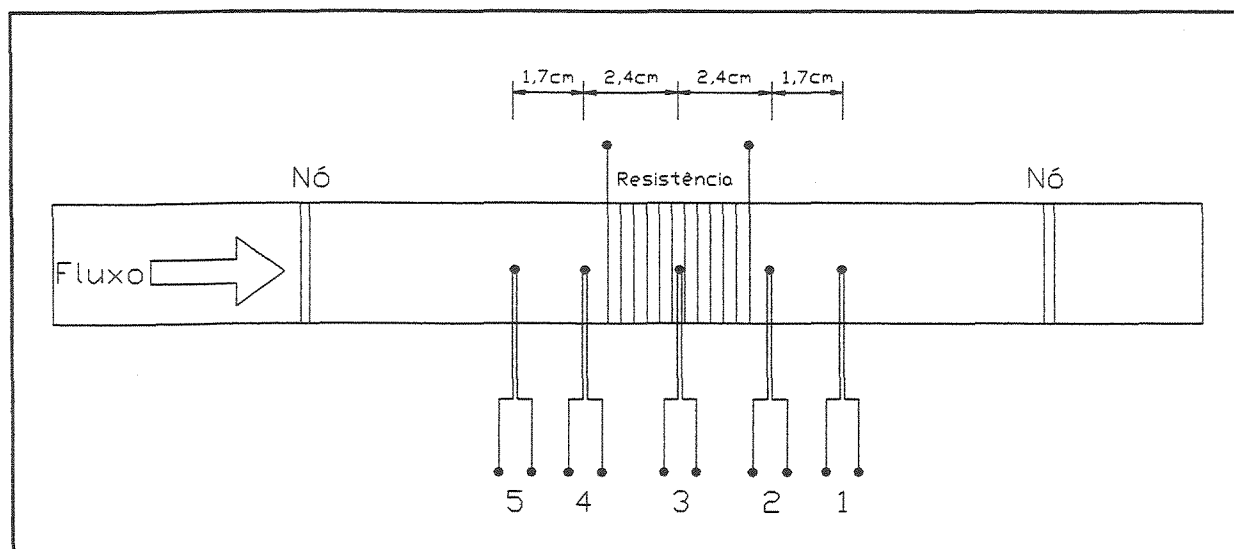


Figura 5 – Esquema de montagem com cinco termopares

Para conseguir montar os termopares de acordo com a figura 5 foi necessário mudar a forma da resistência. A resistência passou a ter o formato de uma espira, para moldá-la era necessário apenas enrolar uma metade do fio de níquel-cromo antes e a outra metade depois do termopar 3. Após a definição da

melhor posição dos termopares em relação à resistência de aquecimento (figura 6), passou-se para a segunda fase.

O esquema de montagem do sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida definido na segunda fase pode ser vista na figura 6 e figura 26 (anexo 2).

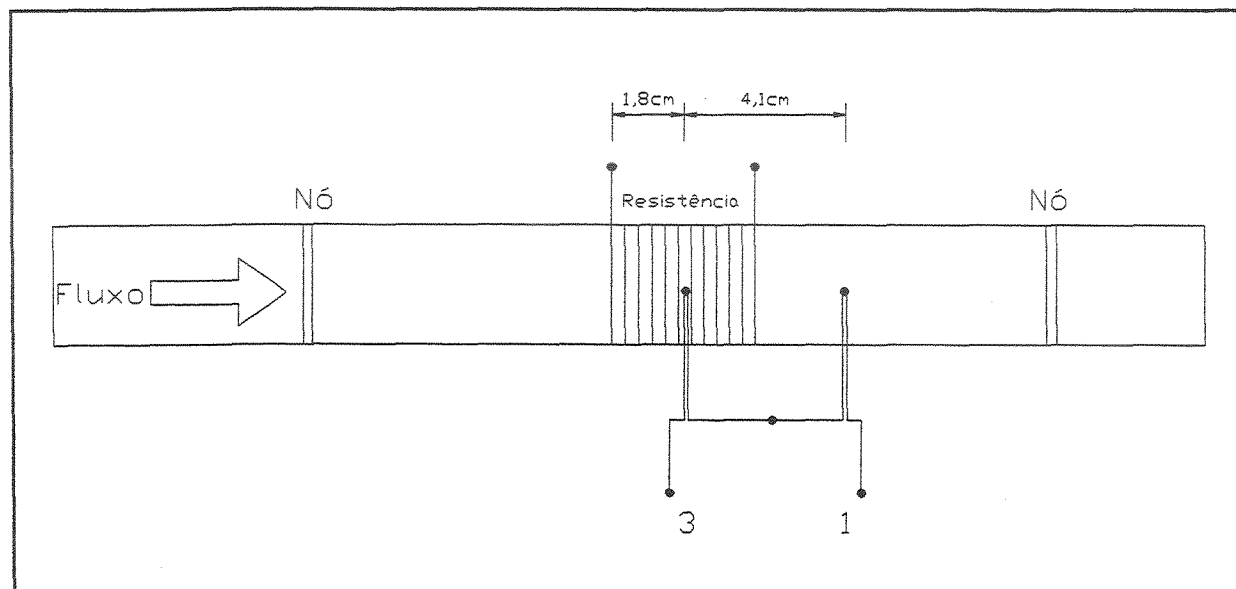


Figura 6 - Esquema de montagem definido para o sistema de medição de fluxo de transpiração líquida.

Na segunda fase, a montagem do ensaio foi conforme a figura 3, e depois, para obter uma maior rapidez para obtenção dos dados, conforme a figura 7.

Nessa fase utilizou-se dois tipos diferentes de esquemas de montagem. Inicialmente considerou-se a montagem da figura 3. Entretanto, nesse esquema, apenas um segmento de caule era monitorado. Assim, optou-se pelo monitoramento dos caules a partir do esquema da figura 7.

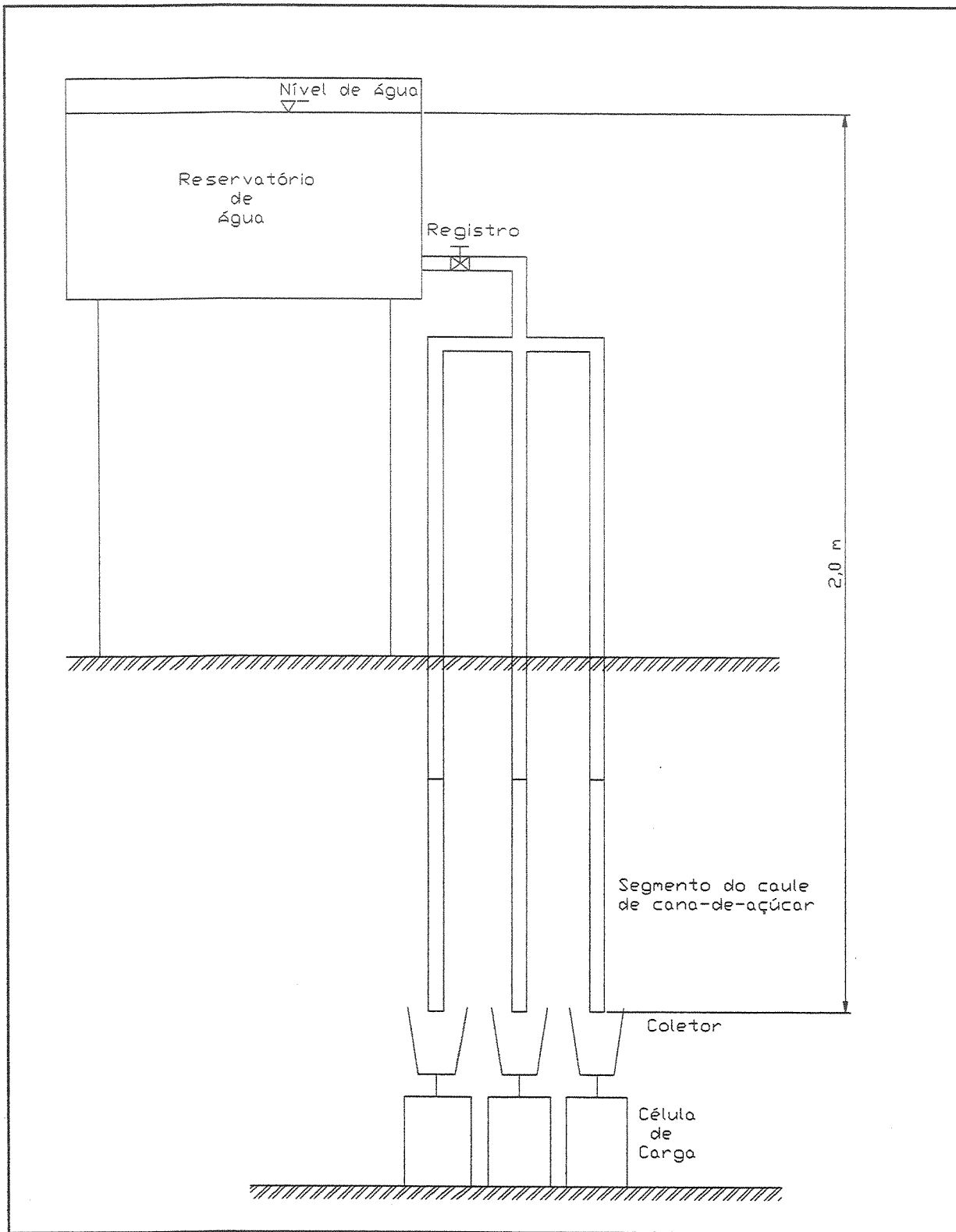


Figura 7 – Montagem do ensaio em laboratório com células de carga

#### 4.6. Ensaio em Evapotranspirômetro

A segunda fase do trabalho foi realizada no Módulo Didático para Demonstração da Transpiração Vegetal, a partir de Evapotranspirômetros de Nível Freático Constante. Nesse módulo utilizou-se a mesma variedade de cana-de-açúcar (NA72 454).

Os evapotranspirômetros estão instalados nas proximidades da estação climática da Faculdade de Engenharia Agrícola. Assim, a variação da taxa de transpiração, medida pelo sistema de medição de transpiração líquida, foi comparada com a variação da radiação global.

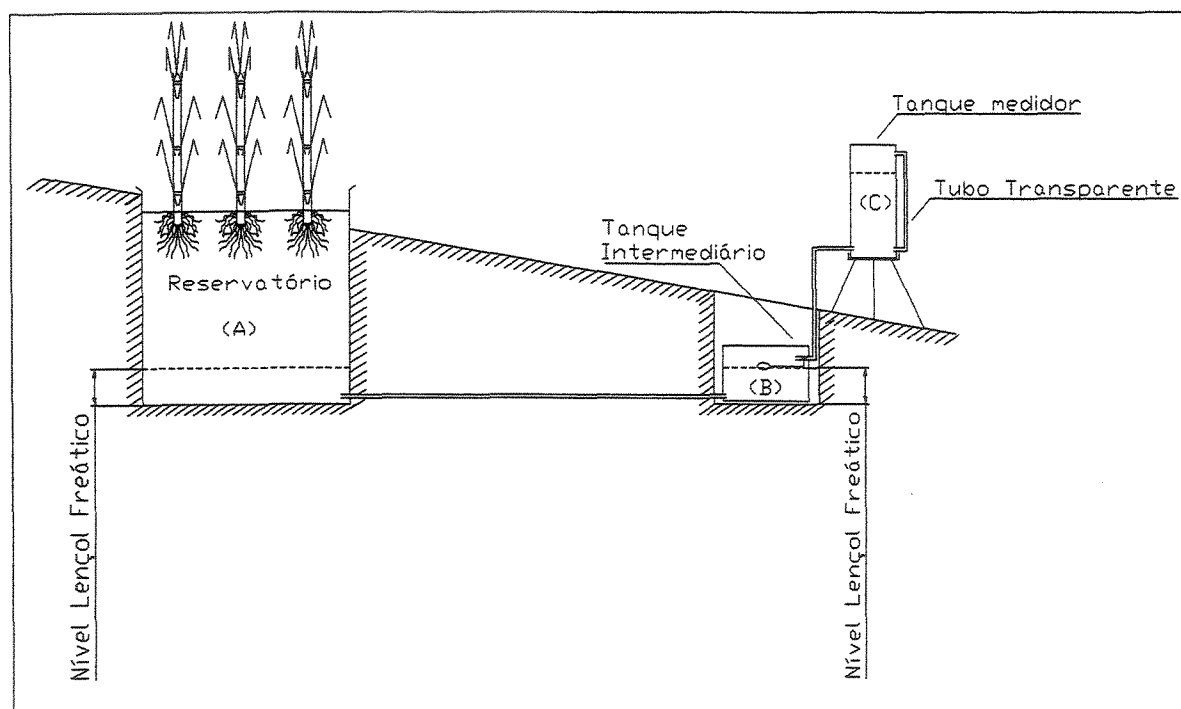


Figura 8 – Esquema do evapotranspirômetro

O evapotranspirômetro representado na figura 8 constitui-se de um reservatório de transpiração devidamente impermeabilizado (A), um tanque intermediário (B) e um medidor (C). No reservatório de transpiração (A), onde foi colocada a vegetação monitorada, foi utilizada uma caixa de água de 5000 litros confeccionada em fibra de vidro, tendo como dimensões: 2,15m de diâmetro superior e 1,84m de profundidade. Na parte inferior do reservatório foi conectada uma mangueira de borracha de 2,5cm de diâmetro, que o interliga ao tanque intermediário. O tanque intermediário controla a passagem da água do tanque medidor para o reservatório (A), a partir de um sistema de bóia. Esse tanque impermeável é composto de uma caixa de água de cimento-amianto de 100 litros. O tanque medidor foi associado a uma escala graduada, na qual mediu-se o volume de água evaporado pela vegetação no reservatório (A). Para o tanque medidor foi utilizado um tubo cilíndrico de 25cm de diâmetro assentado sobre um suporte de ferro.

O sistema de medição de transpiração líquida, neste ensaio, foi montado de acordo com a figura 6 e figura 9.

O sistema foi instalado em quatro caules de cana-de-açúcar (entre as vinte e duas existentes), que estavam plantadas dentro do volume de controle do evapotranspirômetro (reservatório de transpiração). De um total de 22 caules, selecionou-se quatro, em função da posição dos caules para melhor representação da transpiração do evapotranspirômetro.

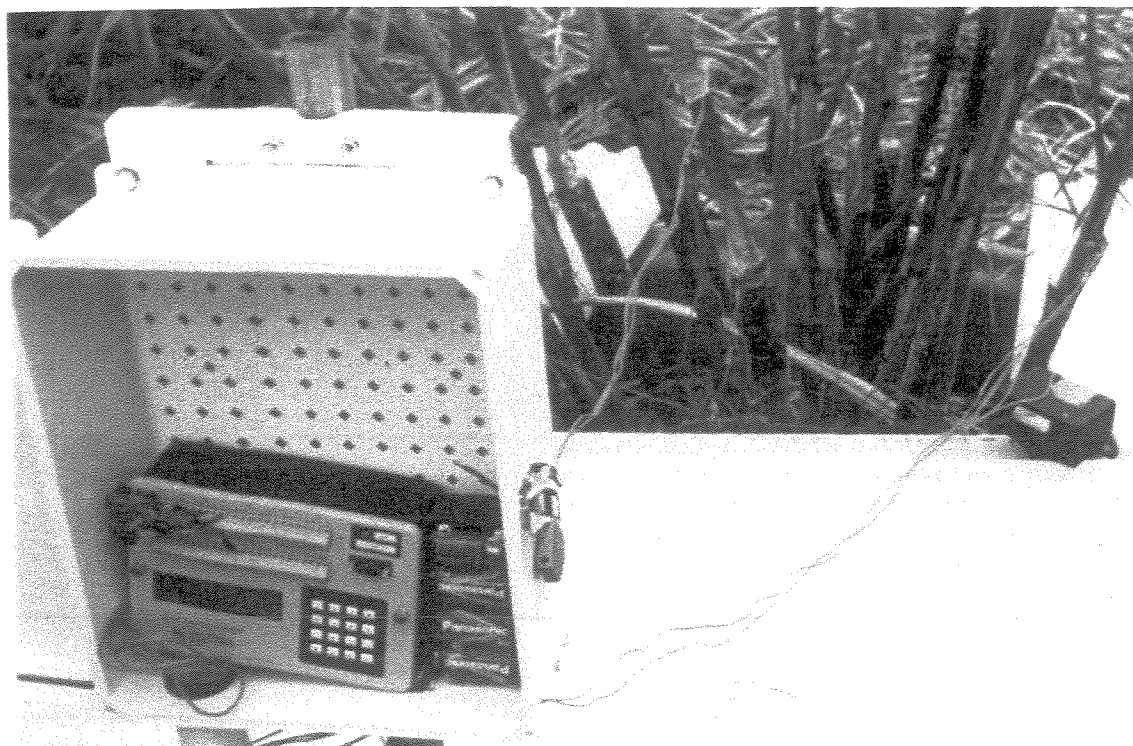


Figura 9 – Foto da instalação do sistema de medição de fluxo de transpiração líquida no evapotranspirômetro.

Para poder comparar a variação do fluxo de seiva medido neste ensaio com a variação da radiação foi utilizado dados de uma estação meteorológica localizada no posto meteorológico da Faculdade de Engenharia Agrícola. Esta estação localizava-se a uma distância de 38 m do evapotranspirômetro.



## 5. RESULTADOS

### 5.1. Determinação de tensão do módulo de aquecimento e posição dos termopares

Nos primeiros ensaios em laboratório, que foram feitos com a montagem conforme figura 4, obtiveram-se resultados conforme os gráficos das figuras 10 e 11.

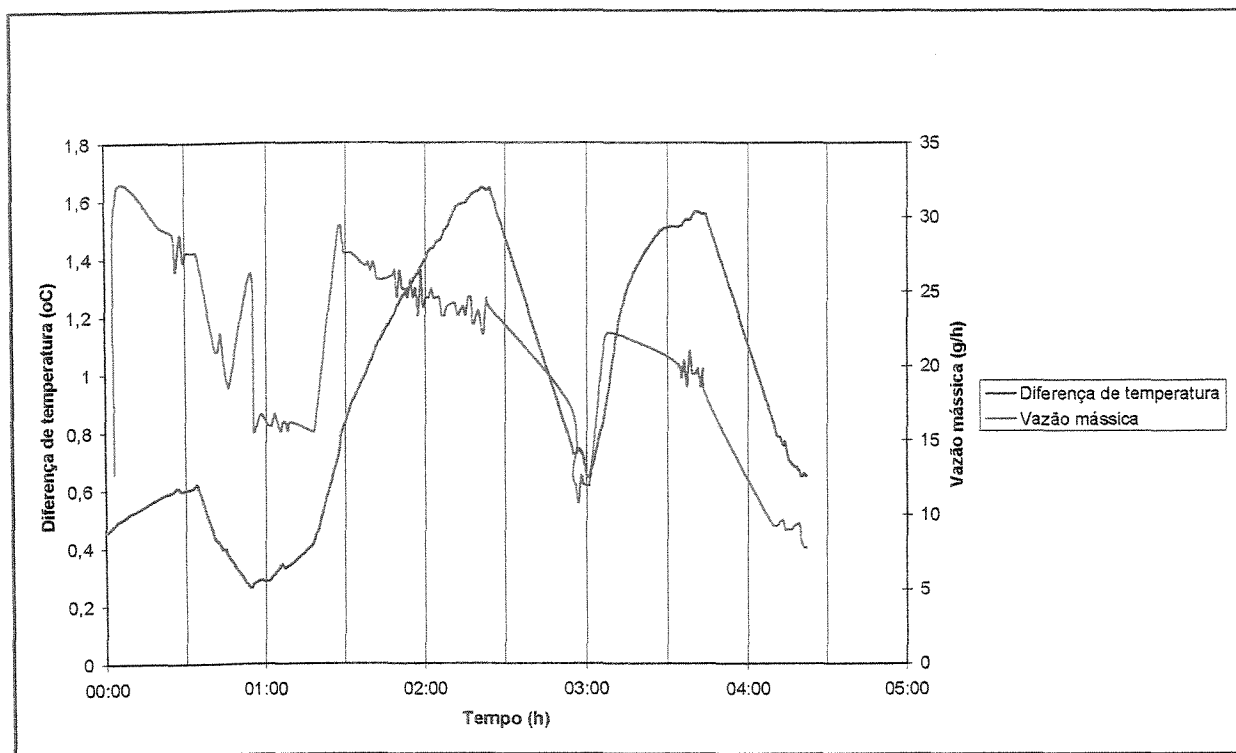


Figura 10 – Valores de diferença de temperatura e correspondentes de variação de vazão mássica para tensão de 1,265 Volts.

Os dados da variação de temperatura da figura 10 foram obtidos com a aplicação de uma tensão de 1,265Volts. A variação da vazão mássica correspondente foi gerada pela alteração da pressão da bomba de vácuo. O gráfico, da figura 10, mostra pouca sensibilidade do sistema de medição dos fluxos de seiva quando se

alterou significativamente a vazão (10g/h, 30% da vazão mássica máxima medida neste ensaio). O ensaio apresentou, também, os mesmos valores de diferença de temperatura para vazões diferentes e, ainda, os picos de máxima diferença de temperatura não coincidem com os picos de máxima vazão.

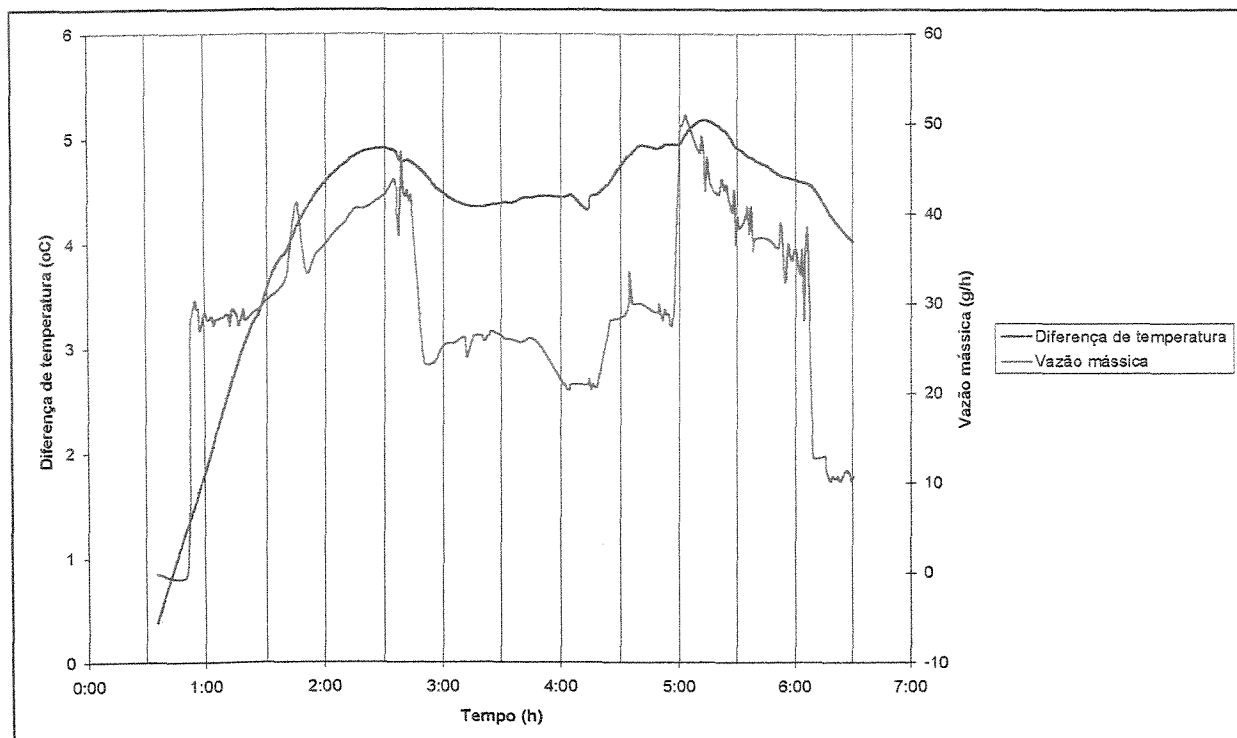


Figura 11 – Valores de diferença de temperatura e correspondentes de variação de vazão mássica para tensão de 1,865 Volts.

O primeiro ensaio foi realizado com a tensão de 1,265Volts, enquanto que para o segundo ensaio optou-se por uma tensão superior, 1,865Volts. A figura 11 apresenta o resultado da mudança de tensão. Embora, tenha melhorado em relação a aproximação dos picos, ainda não mostrou uma boa sensibilidade, principalmente, para a mesma diferença de temperatura onde foram encontradas diferentes vazões.

Como os resultados das figuras 10 e 11 não apresentaram os resultados esperados, optou-se pelo estudo de diferentes posições dos termopares. As posições consideradas no estudo foram representadas na figura 5.

Na figura 12 podem ser verificados os resultados obtidos no ensaio das diferentes posições dos termopares para as variações de vazão mássica.

Como os pontos de tomada de temperatura escolhidos não apresentaram os resultados esperados, partiu-se para a colocação de cinco termopares no segmento do caule conforme figura 5. Na figura 12 pode ser visto os resultados obtidos em ensaio com cinco termopares.

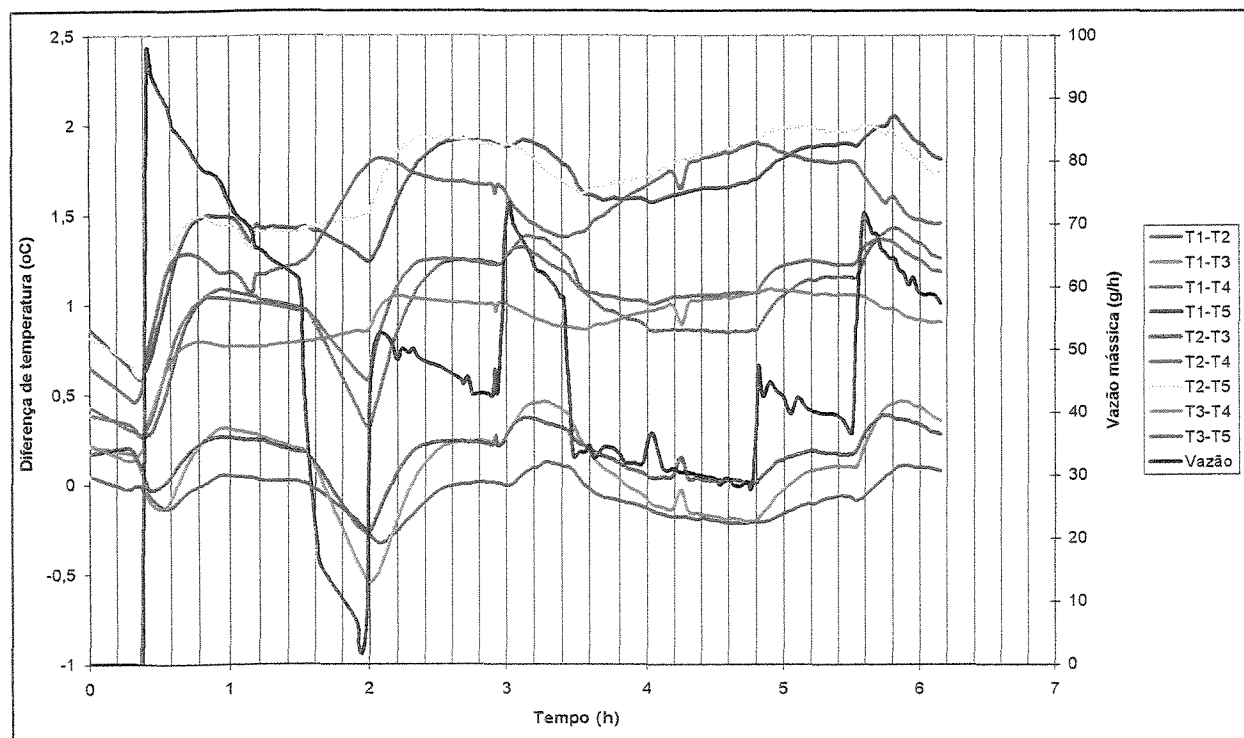


Figura 12- Variação da diferença de temperatura entre os termopares e correspondente variação mássica em função do tempo, para diferentes posições dos termopares.

Analisando-se os resultados das curvas de diferença de temperatura da figura 12, verificou-se que as variações de temperatura entre os termopares 1 e 3

(T1-T3) apresentaram um bom desempenho. Nessa curva obteve-se uma melhor amplitude e sensibilidade quando comparada às outras curvas.

A curva do diferencial entre o termopar 1 e 3 (T1-T3) apresentou na terceira hora do ensaio um pico de valor  $0,462^{\circ}\text{C}$ , que corresponde a um pico de vazão mássica de  $73,2\text{g/h}$  (ocorrido um pouco antes). No instante 5h e 20 minutos do ensaio, para um outro pico de valor  $0,462^{\circ}\text{C}$  que correspondem um valor de pico de vazão mássica de  $71,4\text{g/h}$ . Essa curva manteve a relação entre diferença de temperatura e vazão mássica, pois para valores de mesma diferença de temperatura obteve-se uma diferença de 2,5% em relação a vazão mássica. A curva (T1-T3), também, apresentou um bom tempo de resposta à variação da vazão mássica. Assim, optou-se pela posição dos termopares 1 e 3 (figura 6).

Após a definição da posição dos termopares (figura 6), passou-se à determinação da melhor tensão aplicada. As figuras 13 e 14 mostram o ensaio realizado com os termopares colocados de acordo com a figura 6. A figura 13 apresenta resultados com a aplicação de uma tensão de 1,265 Volts na resistência e na figura 14 com a aplicação de 1,865 Volts. A tensão de 1,865 Volts resultou em uma melhor sensibilidade para representação de variação das vazões mássicas. Assim, escolheu-se essa tensão para o estudo.

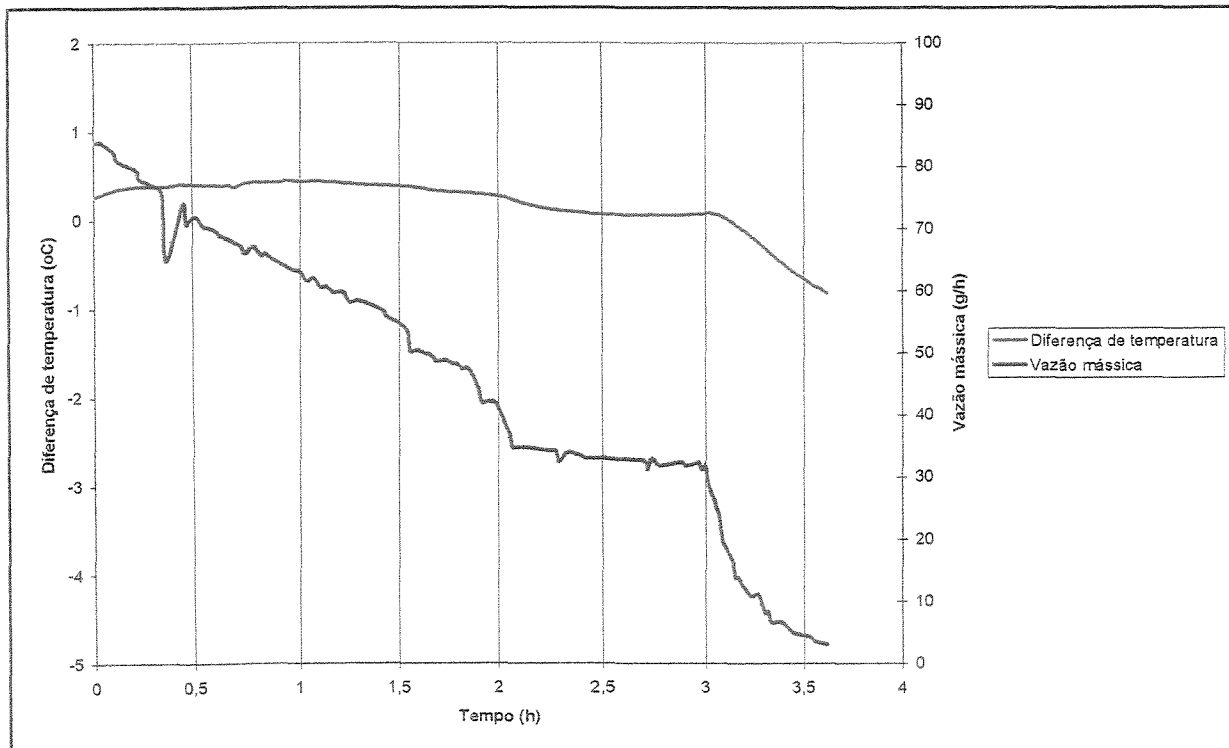


Figura 13 – Ensaio com tensão de 1,265 Volts

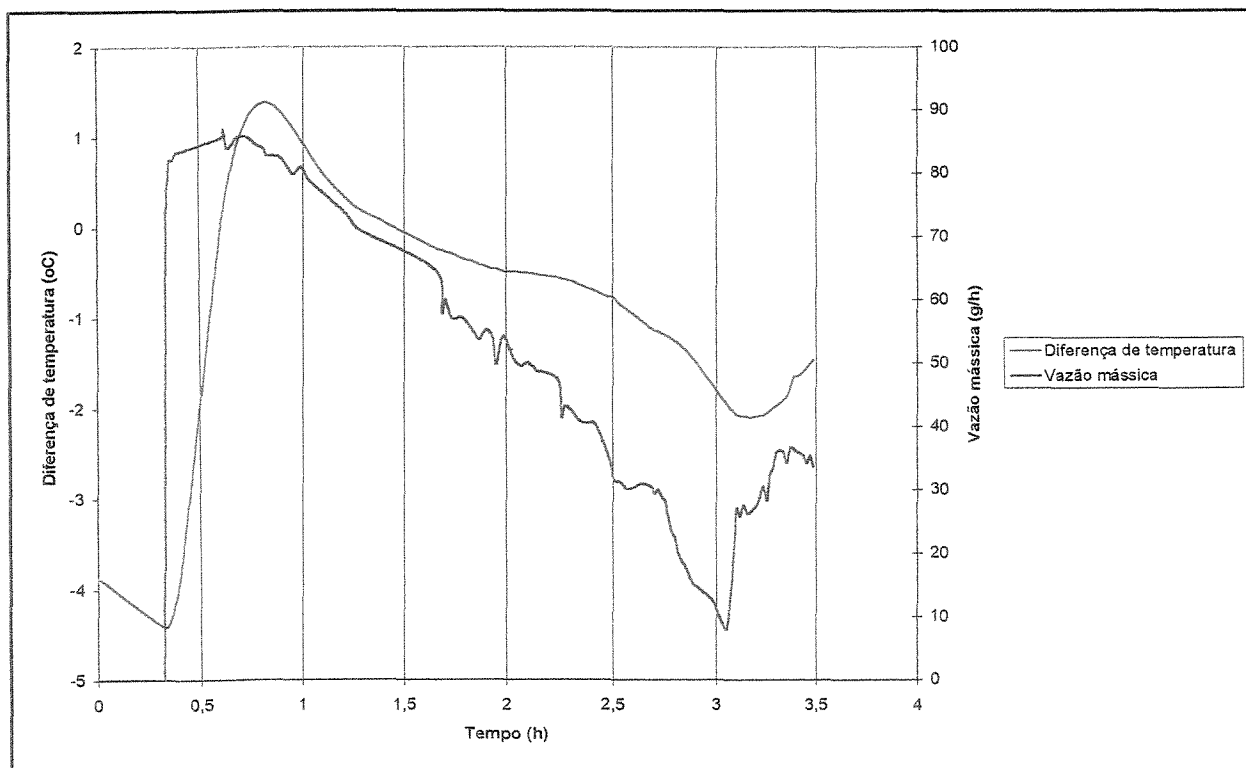


Figura 14 – Ensaio com tensão de 1,865 Volts

### 5.1.1. Ajuste do sistema de medição dos fluxos de transpiração

Determinado os pontos para tomada de temperatura (T1-T3) e a tensão aplicada (1,865 Volts), iniciou-se a coleta de dados para ajuste do sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida em relação a vazão mássica medida. A vazão mássica foi medida primeiramente por uma balança de precisão (figura 3) e posteriormente com o sistema de células de carga (figura 7), que permitiu um maior dinamismo na coleta de dados. Um exemplo de resultado de um ensaio de calibração pode ser visto na figura 15.

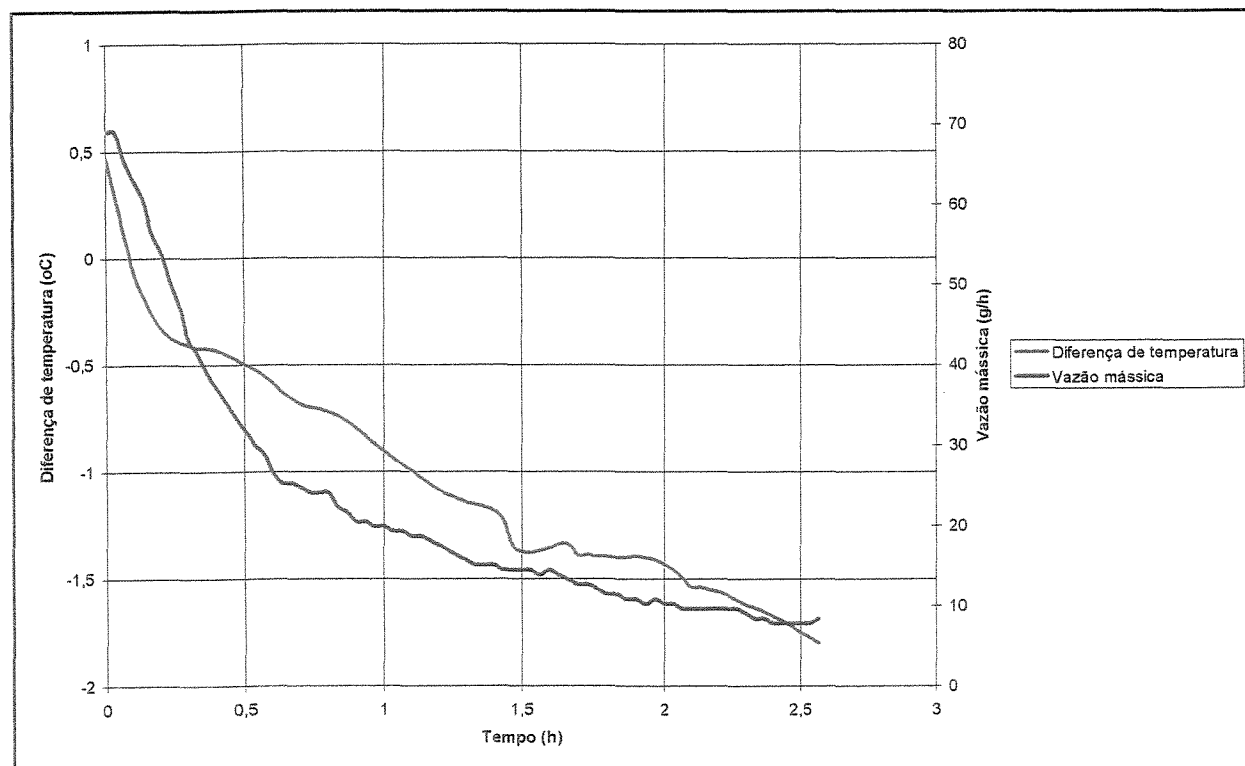


Figura 15 – Ajuste do sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida.

Após vários ensaios de ajustes foi possível montar o gráfico da figura 16. Essa figura relaciona as diferenças de temperatura dos termopares com a vazão mássica. Analisando-se o gráfico de ajuste (figura 16) optou-se por dividir todo o período de medida em dois. A cada período, então associou-se um modelo linear para expressar a relação entre as diferenças de temperatura e as vazões mássicas.

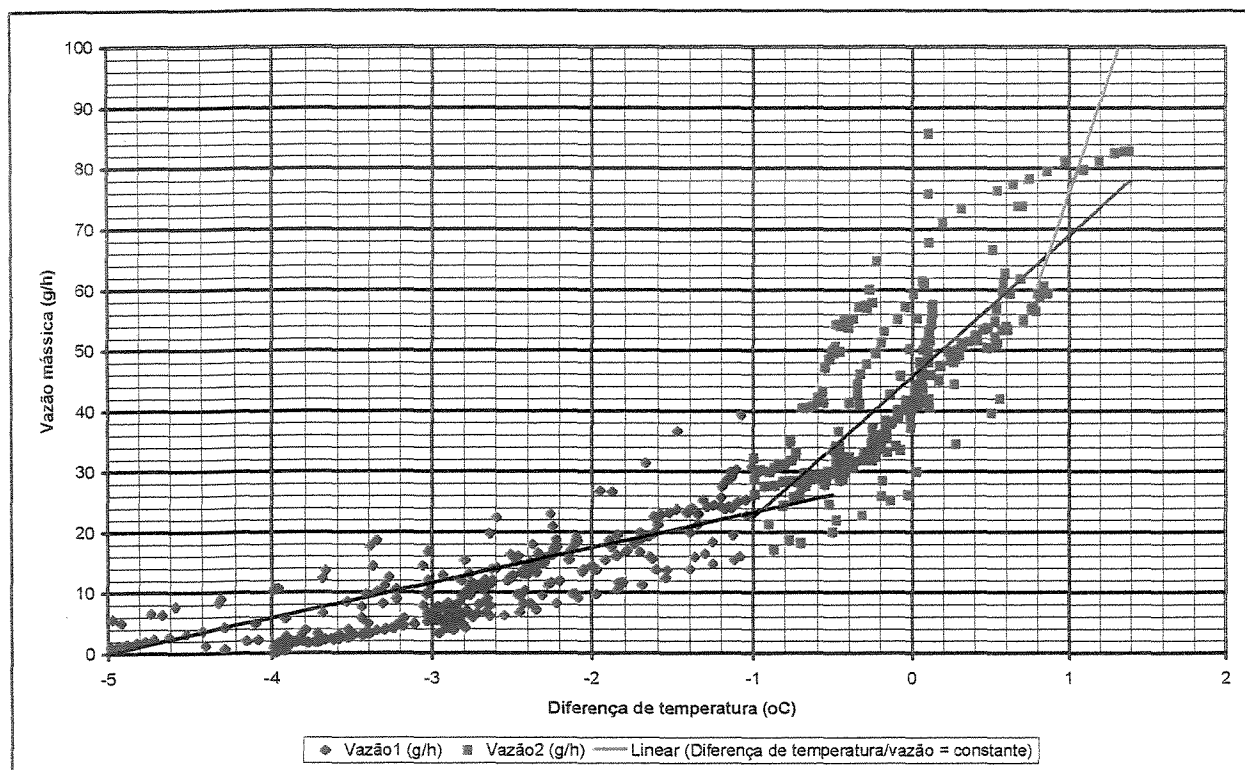


Figura 16 – Ajuste do sistema de medição dos fluxos de seiva

O primeiro período de dados considerou os pontos com diferença de temperatura inferior a  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , que resultou na equação 10 ( $R^2 = 0.70$ ).

$$V_m = 5,8168.\Delta T + 29,08 \quad [ 10 ]$$

onde:  $V_m$  = vazão mássica (g/h);

$\Delta T$  = Diferença de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

O segundo período de dados determinou os pontos com diferença de temperatura superior a  $-1,0^{\circ}\text{C}$ , que resultou na equação 11 ( $R^2 = 0.61$ ).

$$V_m = 23,255.\Delta T + 45,739 \quad [ 11 ]$$

Nos vários ensaios de ajuste não foi possível obter uma haste que proporcionasse valores de vazões superiores a 90 g/h. Assim, optou-se por verificar uma tendência que pudesse ser observada em relação às vazões superiores a 90h/h.

O gráfico da figura 17 foi construído com este objetivo. Esse gráfico apresenta a relação das diferenças de temperatura divididas pelas respectivas vazões mássicas em função das diferenças de temperatura. Nesse gráfico pode-se observar que para diferenças de temperatura superiores a  $0,8^{\circ}\text{C}$  os pontos formam um patamar, para um valor constante de  $0,01315^{\circ}\text{C.h/g}$ . Assim, considerou-se um modelo linear para o período de ajuste para valores de diferenças de temperatura superiores a  $0,8^{\circ}\text{C}$ . A equação para esse período pode ser escrita como:

$$V_m = \Delta T/0,01315 = 76,05. \Delta T \quad [ 12 ]$$



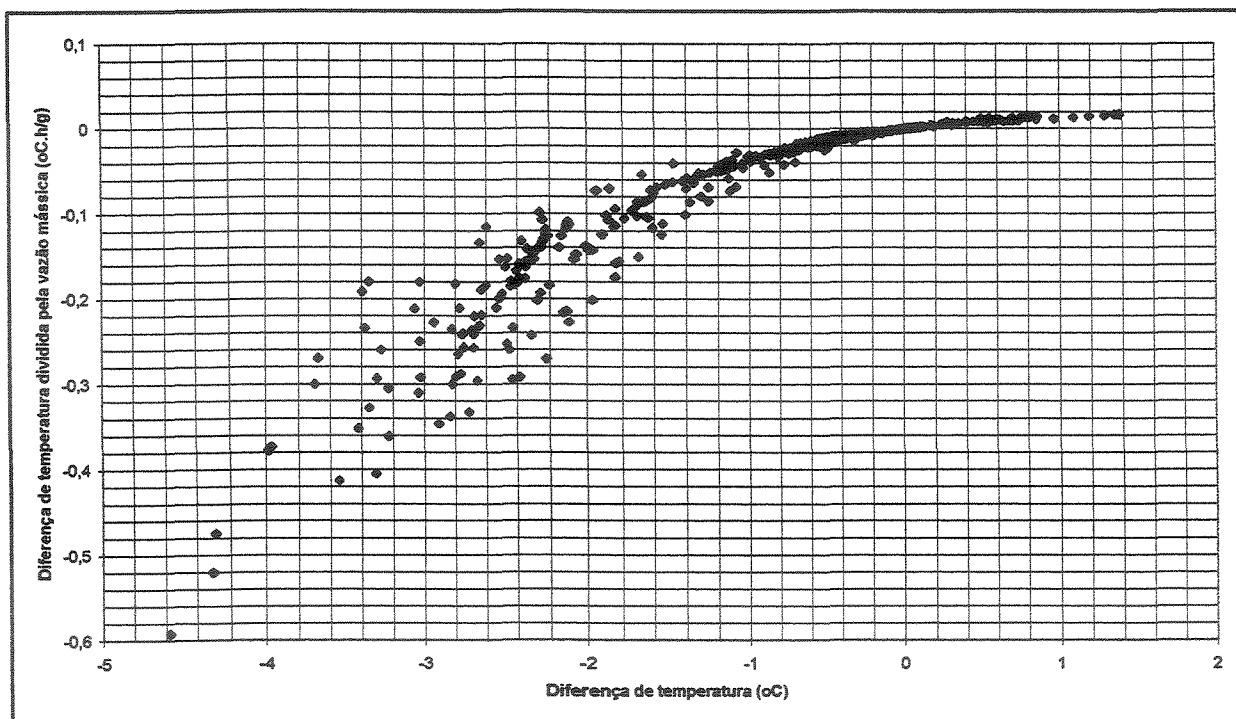


Figura 17 – Relação das diferenças de temperatura dividida pela respectiva vazão em função da relação das diferenças de temperatura

Dessa maneira, o ajuste do sistema de medida apresenta três períodos, que serão considerados no cálculo da vazão mássica para as hastes de cana-de-açúcar.

Houve uma faixa de pontos, de  $-1,0^{\circ}\text{C}$  até  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , que participaram na regressão linear das equações 10 e 11, para que houvesse um ponto de intersecção entre elas.

O ponto de intersecção entre a equação 10 e a equação 11 é referente a  $0,955^{\circ}\text{C}$  de diferença de temperatura, o ponto de intersecção entre a equação 11 e 12 é  $0,866^{\circ}\text{C}$  de diferença de temperatura, ou seja, estes pontos delimitam qual equação será usada para obter a vazão mássica.

## 5.2. Resultados do ensaio no evapotranspirômetro

O sistema de medição estudado foi instalado em quatro caules de cana-de-açúcar, que apresentaram resultados de medidas de diferença de temperatura conforme figura 18.

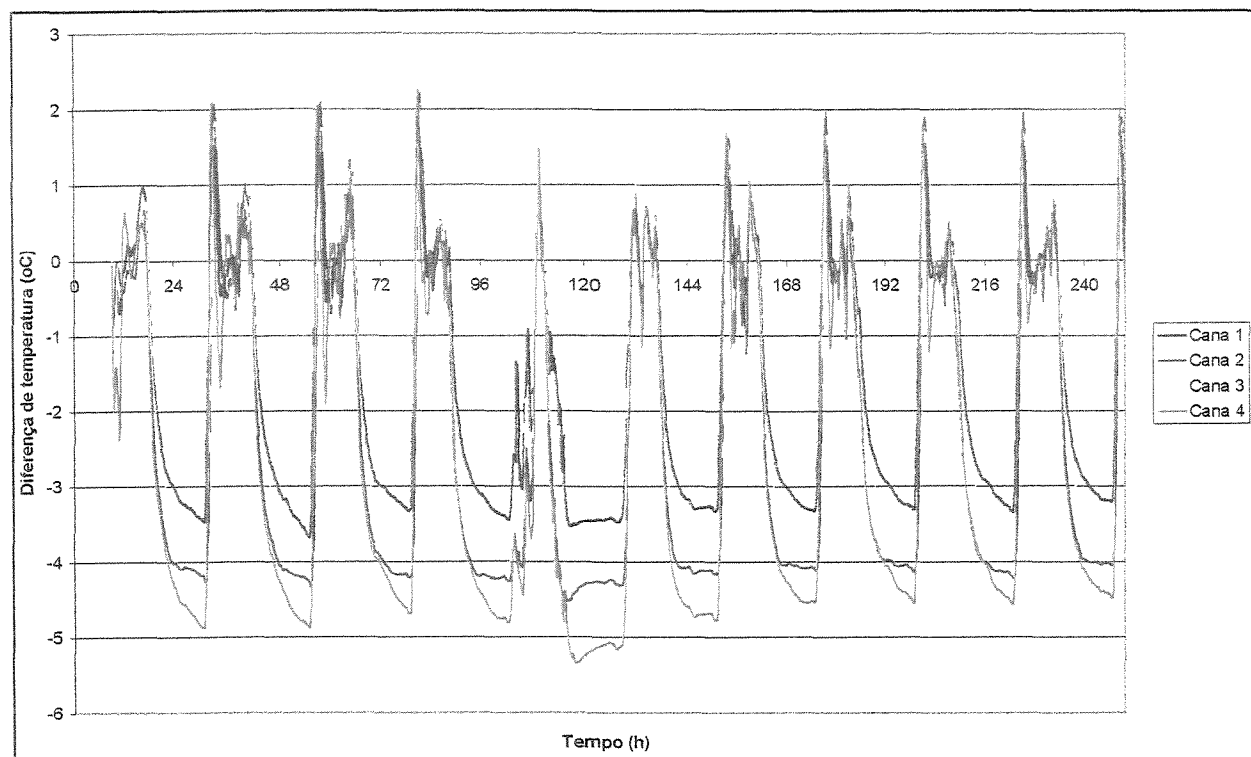


Figura 18 – Diferenças de temperatura medidas em quatro caules de canas-de-açúcar instalados no evapotranspirômetro (dia 19 até dia 28 de Março de 1999).

Na seqüência dos valores medidos na figura 18, pode-se observar que no período noturno as diferenças de temperatura de menor valor não foram iguais a  $-4,999^{\circ}\text{C}$  (correspondendo a vazão mássica zero, conforme a equação 10). Durante o período noturno o fluxo de seiva tende ao valor zero. Assim, decidiu-se por corrigir os valores das diferenças de temperatura observadas. A correção foi realizada a partir da determinação do menor valor da diferença de temperatura

observada em cada caule monitorado. Essa diferença corresponderia ao ponto zero na vazão mássica, ou seja, essa diferença deve assumir o valor de  $-4,999^{\circ}\text{C}$ .

Para tanto, necessitou-se somar uma constante para todos os valores de diferença de temperatura. Para cada curva foi utilizada a constante conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Valores das constantes de correção das curvas de diferença de temperatura. Onde C 1, 2, 3 e 4 são as constantes de correção para medidas feitas na cana-de-açúcar 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

|                                  | C 1    | C 2    | C 3    | C 4   |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Constante ( $^{\circ}\text{C}$ ) | -1,320 | -0,477 | -1,111 | 0,344 |

Após a correção das diferenças de temperatura pelos valores do Quadro 1, calculou-se o fluxo de seiva (vazão mássica) utilizando-se as equações obtidas da figura 16. O resultado do fluxo de seiva correspondente aos valores da figura 18 podem ser observados na figura 19.

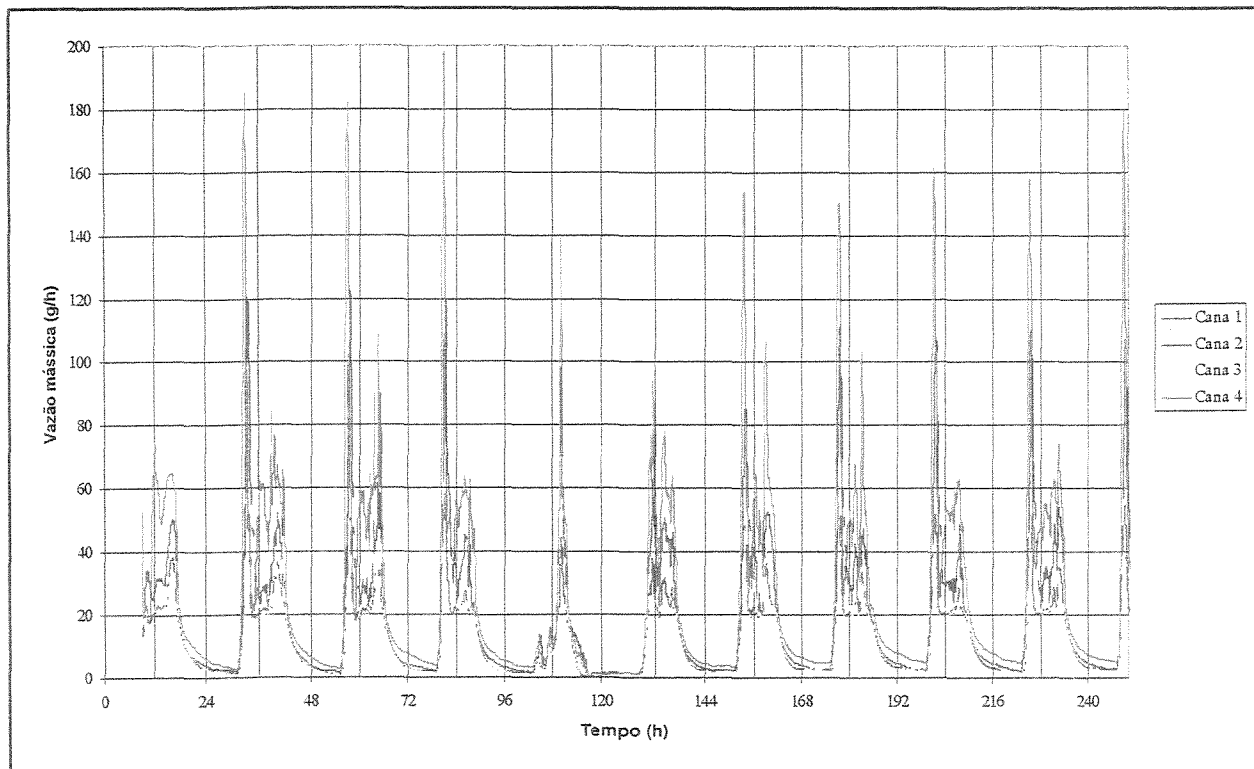


Figura 19 – Fluxos de seiva de quatro caules de canas-de-açúcar monitorados no evapotranspirômetro (dia 19 até dia 28 de Março de 1999).

Nos ensaios, verificou-se que o fluxo máximo de seiva atingiu o valor 198,2g/h e o mínimo, o valor zero.

Na figura 19 pode-se verificar que o fluxo de seiva atinge os valores inferiores ou nulos durante a madrugada (após às 24 horas) e valores máximos no período entre 10 e 12 horas.

Para verificar se a dinâmica diária dos fluxos de seiva está sendo monitorada com sensibilidade em função da demanda de evaporação, foi necessário relacioná-la à evolução da radiação solar global.

Um ponto importante no monitoramento do fluxo de seiva, utilizando-se sensores de balanço de energia, é sua sensibilidade em resposta ao clima. Para verificar essa resposta dos fluxos às demandas climáticas de evaporação,

construiu-se o gráfico que mostra a evolução diária do fluxo de seiva e a radiação solar global (figura 20).

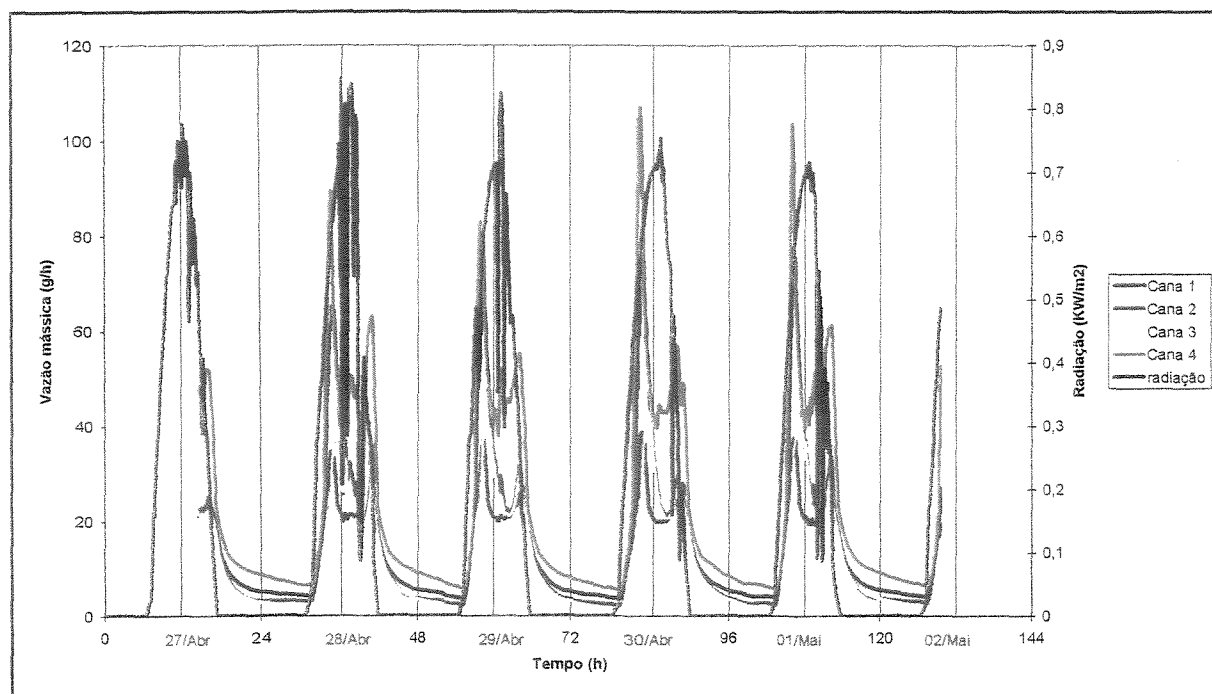


Figura 20 – Evolução diária do fluxo de seiva de cana-de-açúcar e radiação solar global (o tempo zero corresponde à 0h do dia 27 de Abril de 1999).

Na seqüência dos dias da figura 20, verifica-se que a variação do fluxo de seiva acompanhou a variação da radiação global. Isto pode ser verificado melhor nas figuras 21 e 22 (representam o gráfico do dia 28 e 30 de Abril de 1999). No dia 28 de Abril a radiação solar global apresenta vários picos e vales que foram verificados no sistema de medição de transpiração líquida.

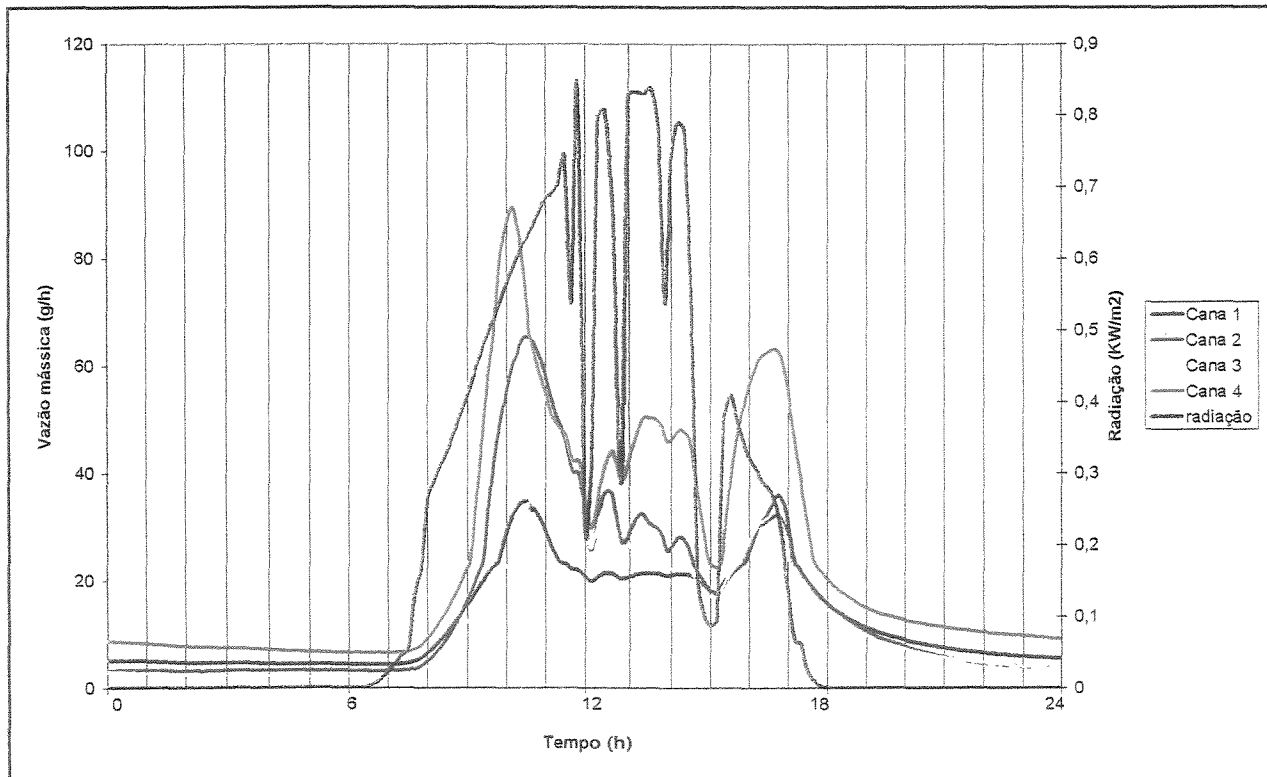


Figura 21 – Evolução diária do fluxo de seiva e da radiação solar global para o dia 28 de Abril de 1999.

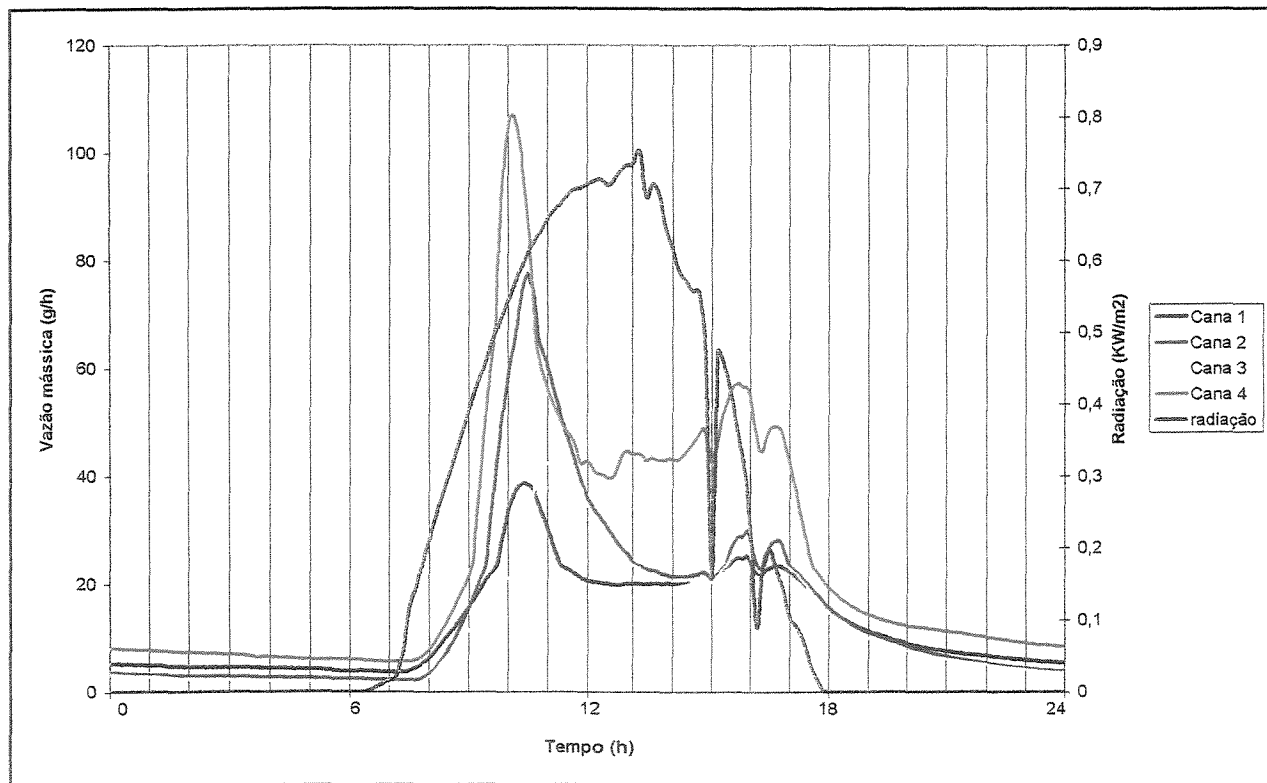


Figura 22 – Evolução diária do fluxo de seiva e da radiação solar global para o dia 30 de Abril de 1999.

Os valores dos fluxos de seiva foram integrados durante os mesmos intervalos de leituras do evapotranspirômetro. Esses horários de leitura estão no Quadro 2.

O Quadro 2 apresenta o resultado de consumo de água do evapotranspirômetro e da transpiração diária obtida pelo sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida estudado.

Quadro 2 – Valores medidos de consumo de água (observados pelo evapotranspirômetro) e de transpiração (sistema de medição de fluxo de transpiração líquida). Cana 1, 2, 3 e 4 são os caules de cana-de-açúcar monitorados no evapotranspirômetro.

| Dia     | Horário | Cana 1<br>(g) | Cana 2<br>(g) | Cana 3<br>(g) | Cana 4<br>(g) | Consumo medido no<br>evapotranspirômetro<br>(média unitária)<br>(ml) | Transpiração<br>média<br>(g) | Diferença entre<br>transpiração média e<br>consumo medido no<br>evapotranspirômetro<br>(%) |
|---------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|------------------------------|--|
| 28/Mar  | 13:14   | 383           | 543           | 423           | 811           | 647  | 540                          | -16,6  |
| 29/Mar  | 13:18   | 359           | 504           | 399           | 764           | 524  | 507                          | -3,4   |
| 30/Mar  | 10:30   | 211           | 254           | 200           | 435           | 335  | 275                          | -17,8  |
| 31/Mar  | 9:26    | 289           | 358           | 317           | 581           | 524  | 386                          | -26,3  |
| 29/Abr  | 12:42h  | 366           | 479           | 383           | 688           | 502  | 479                          | -4,6   |
| 30/Abr  | 9:46h   | 222           | 219           | 192           | 404           | 368  | 259                          | -29,5  |
| 01/Maio | 8:34h   | 285           | 346           | 280           | 546           | 446  | 364                          | -18,4  |
| 02/Maio | 9:26h   | 316           | 392           | 310           | 619           | 469  | 409                          | -12,7  |
| 03/Maio | 8:58h   | 299           | 372           | 289           | 592           | 424  | 388                          | -8,4   |
| 04/Maio | 9:22h   | 311           | 381           | 299           | 611           | 502  | 400                          | -20,2  |
| 05/Mai  | 14:10h  | 425           | 563           | 438           | 868           | 747  | 574                          | -23,3  |
| Total   |         |               |               |               |               | 5488   | 4581                         | -16,5  |

As figuras 23 e 24 apresentam a evolução do consumo diário do evapotranspirômetro e os valores médios, máximos e mínimos de transpiração diária dos caules monitorados.

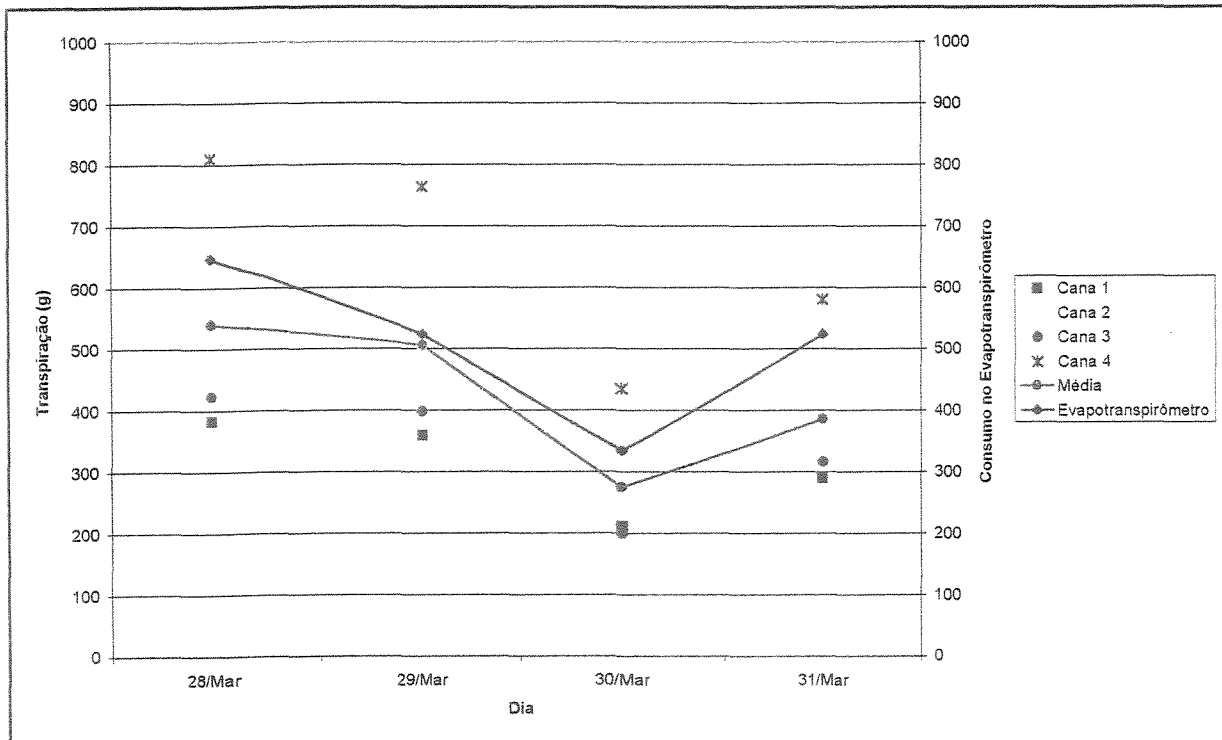


Figura 23 – Gráfico comparativo entre consumo de água e transpiração.

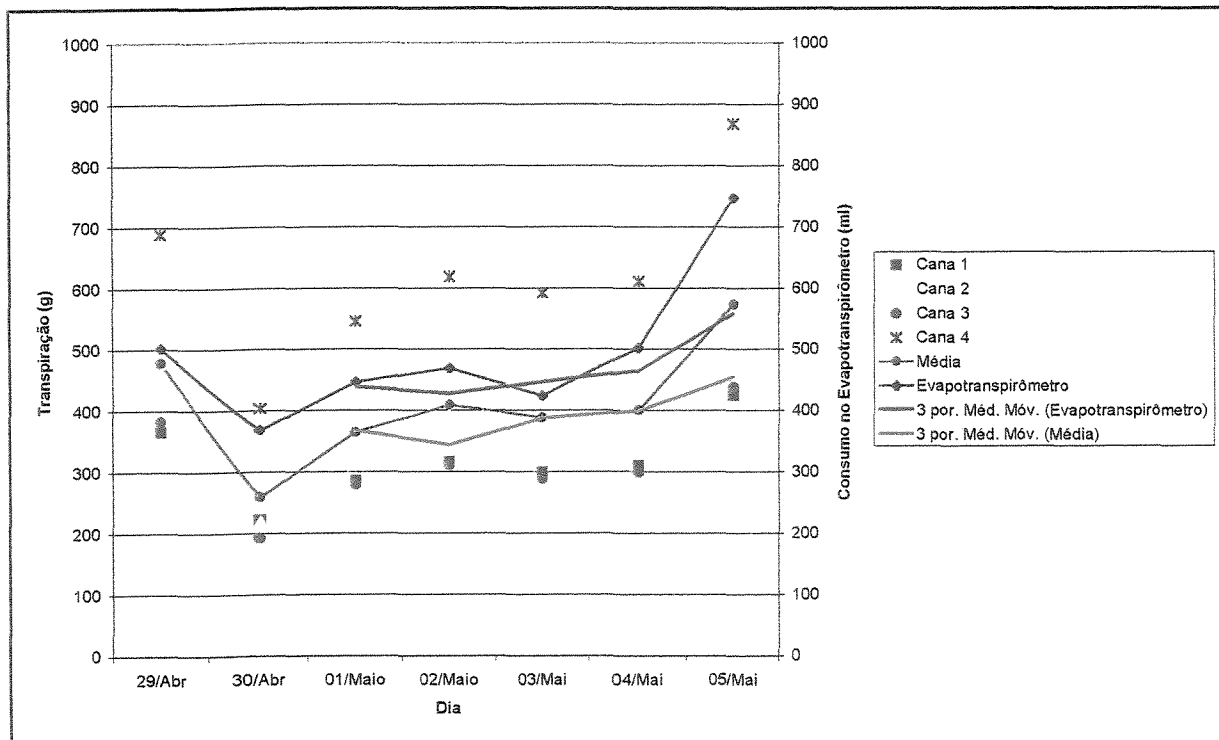


Figura 24 – Gráfico comparativo entre consumo de água e transpiração.



## 6. DISCUSSÕES

Como inicialmente utilizou-se apenas dois pontos de medida de temperatura que não forneceram bons resultados, partiu-se para escolha de outros (PERESSOTTI & HAM, 1996). Obteve-se aqui, resultados que também mostram a melhor precisão ao se colocar um termopar no meio da resistência ou entre duas resistências. A figura 12 mostra claramente a diferença de precisão das medidas dependendo do local onde são inseridos os termopares. A diferença de temperatura entre os termopares 1 e 3 (T1-T3) mostrou a sua viabilidade em relação à precisão e tempo de resposta.

Os ensaios para a determinação do valor da tensão apresentaram como principais objetivos melhorar a precisão de medida (com o aumento da amplitude de diferença de temperatura), e não prejudicar a planta. Depois de testar-se dois valores de tensão escolheu-se trabalhar com tensão de valor 1,865 Volts, pois a maior diferença de temperatura ( $5,343^{\circ}\text{C}$ ) resultante foi próxima à valores contidos na literatura consultada. No trabalho de HAM & HEILMAN (1990), por exemplo, a diferença máxima de temperatura foi de aproximadamente  $3,5^{\circ}\text{C}$ .

Como no trabalho de MANGUEIRA (1990) foram encontrados valores máximos de transpiração líquida próximos à  $180\text{g/h}$ , procurou-se no ensaio em laboratório a provocar uma vazão por entre os segmentos dos caules da cana-de-açúcar. A vazão foi elevada a partir do aumento da pressão da água na passagem

pelos caules. Entretanto, o aumento da pressão na entrada do segmento do caule provocou vazamentos pelos orifícios dos termopares. Então, procurou-se trabalhar com uma bomba de vácuo conforme a figura 3 e figura 30 no anexo 2. A bomba de vácuo colaborou para aumentar o fluxo de água, mas para vazões mais elevadas o vácuo promovia a entrada de ar no sistema pelo orifício dos termopares. Assim, os valores máximos obtidos pelo ensaio foram da ordem de 80 g/h.

Em relação ao ajuste das medidas dos fluxos de seiva instalados no evapotranspirômetro, verificou-se a necessidade de correção para os valores de vazão próximos a zero. No período noturno a vazão mássica tende a zero. Entretanto, nos caules monitorados não atingiram o valor zero, necessitando uma correção.

O sistema de medição de fluxo de transpiração líquida mostrou uma boa sensibilidade quando comparado à variação da radiação solar global. A evolução do fluxo diário apresenta um desenvolvimento muito próximo à evolução da radiação solar global.

Isso demonstra os bons resultados do sistema de medição proposto.

Durante o monitoramento dos fluxos líquidos no evapotranspirômetro, observou-se o fenômeno de depressão de transpiração ao meio dia. Este fenômeno é clássico da cana-de-açúcar que tende a fechar os seus estômatos à radiação solar direta (Mangueira, 1990).

No período entre às 10 horas e às 14 horas verificou-se uma diminuição da transpiração para cana-de-açúcar, mesmo quando um aumento de radiação solar é verificado. Esse fenômeno foi observado em várias outras espécies de plantas.

Comparando-se os resultados, da transpiração média diária dos caules monitorados com o consumo unitário do evapotranspirômetro, observa-se uma diferença de 16,5 % para todo período do ensaio. Essa subestimação mostrou-se sistemática para os valores medidos pelo método de fluxo de seiva. Entretanto, as figuras 23 e 24 apresentaram dois caules com valores de transpiração sensivelmente inferiores aos restantes. Assim, a escolha de quatro caules entre vinte dois existentes no evapotranspirômetro pode não ser representativo da população. Um número superior de caules deveriam ser monitorados para melhor determinação da transpiração no evapotranspirômetro.

## 7. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura de cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva baseado no método termoelétrico mostrou-se capaz de acompanhar a evolução diária da transpiração. Entretanto subestimou a transpiração em média de 16,5%, mesmo assim, torna-se interessante a instalação do sistema em um número maior de caules para representar melhor a população, ou até mesmo instalar em toda população dentro do evapotranspirômetro. O sistema apresentou uma boa sensibilidade nas variações dos fluxos de transpiração líquida acompanhando as variações ocorridas da radiação solar global.

Como a transpiração é uma parcela muito importante de perda de água dentro do ciclo hidrológico mostra-se a importância do desenvolvimento de um método de medida de transpiração líquida. Pois poucos estudos foram realizados relacionando os fatores fisiológicos e ambientais com os fluxos de água para a cultura de cana-de-açúcar em condições de campo.

Na questão econômica verifica-se que é muito interessante trabalhar com este método, pois o seu custo de construção é muito baixo, não ultrapassou R\$ 200,00. Um outro sistema, que tem a possibilidade de medir com uma boa resposta da evolução diária da transpiração, é a utilização de célula de carga, que precisaria medir o peso de um tanque com um volume de 3.000 litros de solo

(aproximadamente 4,5 toneladas) com uma precisão de décimo de grama, o que faz ter um preço elevado.

## 8. BIBLIOGRAFIA

BACKER, J. M. & VAN BAVEL, C. H. M Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants, Plant, Cell and Environment, 10: 777-782, 1987.

BALEK, J. & PAVLIK, O. Sap stream velocity as an indicator of the transpiration-al process. Journal of Hydrology 34: 193-200, 1977.

BAND, E.; PATTERSON, D. L.; NEMANI, R. & RUNNING, S. W. Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporation hillslope hydrology. Agricultural and Forest Meteorology, 63: 93-126, 1993.

BARRET, D. J.; HATTON, T. J.; ASH, J. E. & BALL, M. L. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rain forest and eucalypt forest species of soth-eastern Austrália. Plant, Cell and Environment, 18:463-469, 1995.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the atmosphere - theory, history and application. Reidel Publishing Company, 300 p, 1984.

CALDER, I. R. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, central Wales. Journal of Hydrology 33: 247-265, 1977.

CASPARI, H. W.; GREEN, S. R. & EDWARDS, W. R. N. Transpiation of well-watered and water-stressed Asin pear tree as determined by lysimetry, heat-pulse and estimated by a Penman-Monteith model, Agricultural and Forest Meteorology, 67: 13-27, 1993.

**CHANDRA, S.; LINDSEY, P. A. & BASSUK, N. L.** A gauge to measure the mass flow rate of water in trees. Plant, Cell and Environment, 18:463-469, 1994.

**CLOSS, R. L.** The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. New Zealand Journal of Science, 1 (2): 281-288, 1958.

**COHEN, Y.; FUCHS, M. & GREEN, G.C.** Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in tree. Plant, Cell and Environment 4: 391-397, 1981.

**COHEN, Y.; FUCHS, M.; FALKENFLUG, V. & MORESHET, S.** Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton. Agronomy Journal, 80:398-402, 1988.

**COHEN, Y. & FUCHS, M.** Problems in calibration the heat pulse method for measuring sap flow in the stem of tree and herbaceous plants. Agronomie, 9: 321-325, 1989.

**COHEN, Y.; TAKEUCHI, S.; NOZAKA, J. & YANO, T.** Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods. Agronomy Journal, 85:1080-1086, 1993.

**DECKER, J. P. & WETZEL, B. F.** A method for measuring transpiration of intact under controlled lighth, humidity and temperature. Forest Science 3: 350-354, 1957.

- DECKER, J. P.; GAYLOR, W. G. & COLE, F. D.** Measuring transpiration of undisturbed tamarisk shrubs. Plant Physiology 37: 393-397, 1962.
- DUGAS, W. A. & MAYEUX, H. S.** Evaporation from rangeland with and without honey mesquite. Journal of Range Management, 42: 161-170, 1991.
- DUGAS, W. A.; HEUER, M. L. & MAYEUX, H. S.** Diurnal measurement of honey mesquite transpiration using stem flow gauges. Journal of Range Management, 43: 99-102, 1992.
- EDWARDS, W. R. N. & WARWICK, N. W. M.** Transpiration from a kiwi-fruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. New Zeland Journal Agr. Res. , 27:537-543, 1984.
- FARQUHAR, G. D. & WONG, S. C.** An empirical model of stomatal conductance. Aust. J. Plant Physiol. 11: 191-210, 1978.
- FARQUHAR, G. D. & COWAN, I. R.** Stomatal Function. Stanford University Press. Stanford, California, 452 p, 1987.
- FORTIN, J. P.; VILLENEUVE, J. P.; BENOIT, J.; BLANCHETTE, C.; MONTMINY, M.; PROULX, H.; MOUSSA, R. & BOUCQUILLON, C.** Hydrotel 2.1 - User's guides. Université du Quebec, Institut National de la Recherche Scientifique, 160 p, 1990.
- GIFFORD, G. F.** Apparent sap velocities in big sagebrush as related to nearby environment. Journal of Range Management 21(4): 266-268., 1968.



**GRANIER, A.** Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci. For. 42(2): 193-200, 1985.

**HAM, J. M. & HEILMAN, J. L.** Dynamics of heat balance stem flow gauge during high flow. Agronomy Journal, 82:147-152, 1990.

**HUMPHRIES, W. & GIFFORD, G. F.** A preliminary quantification of the impacts of Aspen to conifer succession on water yield - I. Heat pulse methodology for model calibration, Water Resources Bulletin, 20(2): 173-179, 1984.

**JARVIS, P. G.** The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical Transaction Royal Society of London - Physical Sciences and Engineering 273: 593-610, 1976.

**JARVIS, P. G. & MORISON, J. I. L.** Stomatal control of transpiration and photosynthesis. In: Stomatal physiology ed. Jarvis P. G. e Mansfield T. A. - Seminar series 8, Cambridge University Press, 1981.

**JARVIS, P. G. & MCNAUGHTON, K. G.** Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. Advance in Ecological Research, 15: 1-49, 1986.

**JONES, H. G.** Plants and microclimate. Segunda edicao. Cambridge University Press, 428 p, 1992.

**KLINE, J. R. & MARTIN, J. R., JORDAN C. F., KORANDA J. J.** Measurement of transpiration in tropical trees with tritiated water. Ecology, 51(6): 1068-1073, 1970.

**LASSOIE, J. P., SCOTT, D. R. M. & FRITSCHEN, L. J.** Transpirations studies in Douglas-Fir using the heat pulse technique. Forest Sci., 23:377-390, 1977.

**MACHADO, E. C.** Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar - Dissertação de Mestrado, Instituto de Biologia, UNICAMP, 115 p, 1981.

**MANGUEIRA, D. S.** Desenvolvimento de um sistema de medição de fluxo de seiva por balanço térmico. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1990.

**MANUEL, A.** Política agrícola, eficiência e concentração na agricultura brasileira: um estudo do setor canavieiro paulista. São Paulo, IPE/USP, 182 p, 1986.

**MARSHALL, D. C.** Measurement of sap flow in conifers by heat transport. Plant Physiology 33(6): 385-396, 1958.

**MORISON, J. I. L.** Intercellular CO<sub>2</sub> concentration and stomatal response to CO<sub>2</sub>. In: Zeiger E., Farquhar G. D., Cowan I. R. (editores) Stomatal Function. Stanford University Press, Stanford, California, 1987.

**MOTA, F. S.** Meteorologia Agrícola. 7<sup>a</sup> ed., Ed. Nobel, São Paulo, 1987.

- NEMANI, R. & RUNNING, S. W. Testing a theoretical climat-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forest using satellite data ecosystem simulation. Agricultural and Forest Meteorology, 44: 254-260, 1989.
- OWSTON, P. W. & SMITH, J. L., HALVERSON H. G. Seasonal water movement in tree stems. Forest Science 18(4): 266-272, 1972.
- PARANHOS, S. B. Cana-de-açúcar - Cultivo e utilização. Fundação Cargill, 356-433, 1987.
- PARKER, J. The cut-leaf method and estimations of diurnal trends in transpiration from different heights and sides of an oak and pine. Botanical Gazette 119(2): 93-101, 1957.
- PERESSOTTI, A. & HAM, J. M. A dual-heater gauge for measuring sap flow with na improved heat-balance method. Agronomy journal, 88:149-155, 1996.
- PINTO, N. S. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. & GOMIDE, F. L. S. Hidrologia. Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1976.
- SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. J. Agr. Met. 37(1): 9-17, 1981.
- SAKURATANI, T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. J. Agr. Met. 40(3): 273-277, 1984.

- SAKURATANI, T. & ABE, J.** A heat balance method for measuring water flow rate in stems of intact plants and its application to sugarcane plants. Japan Agricultura Research Quarterly, 19(2): 92-97., 1985.
- SANTOS FILHO, B. G.** Parâmetros biofísicos e fisiológicos associados à economia da água em plantas de cana-de-açúcar (Saccharum spp) submetidas à estresse hídrico. Tese de Doutorado, Instituto de Biologia, UNICAMP, 158 p, 1984.
- SCHULZE, E. D.** The regulation of plant transpiration: interations of feedforward, feedback, and futile cycles. In: Flux control in biological systems - from ensymes to populations and ecosystems; ed. Shulze E. D., Academic Press, Inc. p. 203-235, 1994.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE** Estabelecimento de metas ambientais e reequadramento dos corpos d'água: Bacia do Rio Piracicaba - Série relatórios da Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 81 p, 1994.
- SENOCK, R. S. & HAM, J. M.** Heat balance sap flow gauge for small diameter stems. Plant, Cell and Environment, 16: 593-601, 1993.
- SHACKEL, K. A., JOHNSON, R. S., MEDAVAR, C. K. & PHENE, C. J.** Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. Am. J. Hortic. Sci., 117:351-356, 1992.
- SHARKEY, T. D. & OGAWA, T.** Stomatal responses to lighth. Zeiger E., Farquhar G. D., Cowan I. R. (editores) Stomatal Function. Stanford University Press, Stanford, California, p. 195-208, 1987.

- SHAW, C. B. & GIFFORD, G. F. Sap velocity studies in natural stands of pinyon and juniper tree. Journal of Range Management 28(5): 377-379, 1975.
- SHERIFF, D. W. A new apparatus for the measurement of sap flux in small shoots with the magnetohydrodynamic technique. Journal of Experimental Botany, 23(77): 1086-1095, 1972.
- SINGH, V. P. Hydrologic systems - Water modeling volume I. Prentice Hall, 320 p, 1989.
- SPAROVEK, G. Diagnóstico de uso e aptidão das terras agrícolas de Piracicaba. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 99 p, 1994.
- STEINBERG, S. L. ; VAN BAVEL, C. H. M. & MCFARLAND, M. J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunk of woods plants. Journal Amer. Soc. Hort. Sci, 143 (3): 466-472, 1989.
- STEINBERG, S. L. ; VAN BAVEL, C. H. M. & MCFARLAND, M. J. Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. Agron. Journal, 82: 851-854, 1990A.
- STEINBERG, S. L. ; MCFARLAND, M. J. & WORTHINGTON, J. W. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in pecan. Journal of Experimental Botany, vol. 41, 277: 653-659, 1990B.

**STEWART, J. B.** Measurement and prediction of evaporation from forested and agricultural catchment. *Agricultural Water Management* 8: 1-28, 1984.

**SWANSON, R. H. & LEE, R.** Measurement of water movement from and through shrubs and tree. *Journal of Forestry* 64(3): 187-190, 1966.

**SWANSON, R. H.** Water transpired by trees is indicated by heat pulse velocity. *Agri. Meteorology*. 10:277-281, 1972.

**TEIXEIRA FILHO, J.** Analyse et modélisation du fonctionnement hydrique d'un écosystème forestier méditerranéen - Spatialisation à l'échelle du bassin versant - Tese de Doutorado da Université de Montpellier II - Science et Technique du Languedoc, 312 p, 1995.

**VILLELA, S. M. & MATTOS, A.** Hidrologia Aplicada. MacGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1975.

**WIGMOSTA, M. S. & LANCE, W. V., LETTENMAIER J.** A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Reserch*, vol. 30 (6): 1665-1679, 1994.

**ZIMMERMANN, M. H.** Xylem structure and the ascent of sap. Springer series in Wood Science, Springer-Verlag, 143 p, 1983.

## ANEXO 1

### ESTIMATIVA DA TENSÃO NECESSÁRIA PARA O SISTEMA DE MEDIÇÃO DOS FLUXOS DE TRANSPIRAÇÃO LÍQUIDA

Para a estimativa da tensão necessária ao sistema de medição fixou-se uma vazão de transpiração máxima de 100g/h. Essa vazão máxima foi considerada em função de considerações da literatura que o sistema não tem bons resultados para valores acima de 100g/h. Assim, utilizou-se como base de vazão o fluxo médio de 50 g/h.

Determinou-se, também, uma diferença de 1°C para essa vazão de transpiração média.

Nos estudos de HAM & HEILMAM (1990) e de PERESSOTTI & HAM (1996) as diferenças de temperatura não ultrapassaram 5°C e 3°C respectivamente. Para calcular a potência necessária, considerando-se as exigências anteriores, tem-se:

$$Q = m.c.\Delta T$$

Onde:  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  – Diferença de temperatura;  
 $c = 4,16 \text{ J}/(\text{g}.\text{°C})$  – Calor específico da seiva;  
 $m = \text{massa (g)}$ ;  
 $Q = \text{Energia (J)}$ .

Como estamos trabalhando com vazão mássica 50g/h, não obteremos o valor de energia mas, sim, de potência:

$$P = 208,00 \text{ J/h} \quad \text{ou} \quad P = 0,057777\text{W}$$

Admitindo-se uma vazão mássica de 7g/h como um fluxo mínimo a ser determinado, pode-se calcular a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) correspondente:

$$\Delta T = Q/(m.c)$$

$$\Delta T = 0,0577W/(7g/h.4,16J/(g.^{\circ}C))$$

$$\Delta T = 7,133^{\circ}C$$

Para vazão de 100 g/h, temos:

$$\Delta T = 0,0577W/(100g/h.4,16J/(g.^{\circ}C))$$

$$\Delta T = 0,500^{\circ}C$$

Ou seja, uma diferença de temperatura dentro da precisão de leitura.

Assim, para o cálculo da tensão será utilizado a seguinte fórmula:

$$U = (P.R)^{0,5}$$

Onde:  $R = 7,945\Omega$  - resistência

$P = 0,05777W$  - Potência

$U =$  Tensão (Volts)

Portanto,

$$U = 0,677 \text{ Volts}$$

Como não estamos considerando perda de calor para o ambiente, esta é a tensão mínima necessária. Entretanto, a fonte foi construída com saídas de tensões diferentes, conforme figura 25.



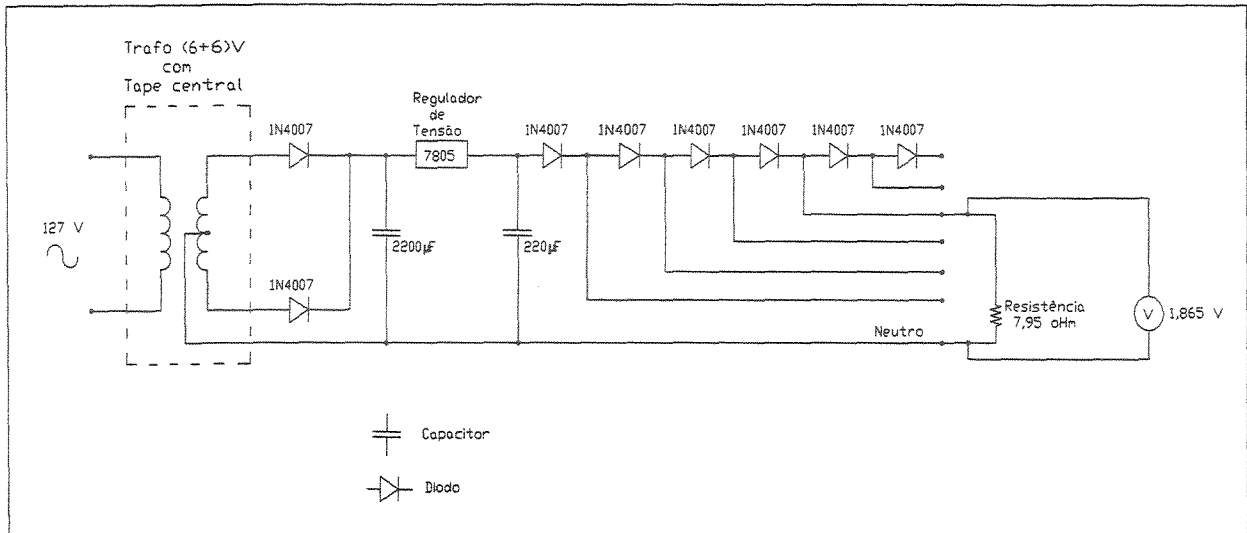


Figura 25 – Esquema de montagem da fonte com 6 saídas de tensões diferentes.

## ANEXO 2

## FOTOS DOS ENSAIOS

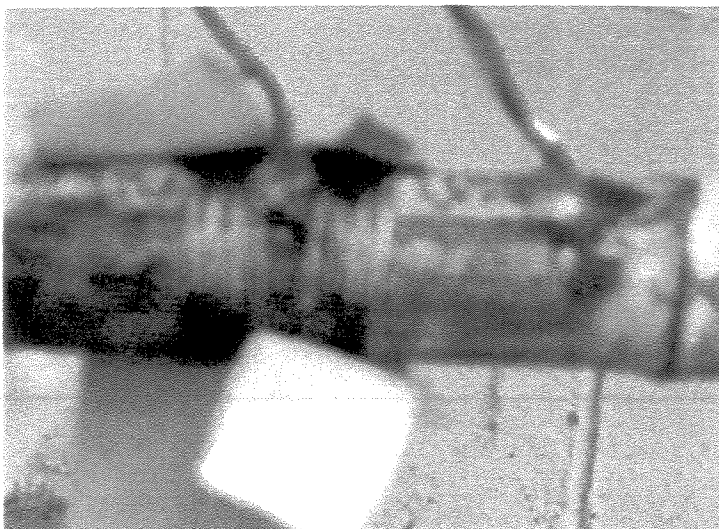


Figura 26 – Detalhe da resistência e termopar instalados no caule da cana-de-açúcar



Figura 27 – Detalhe de instalação do sistema de medição de fluxo de transpiração líquida

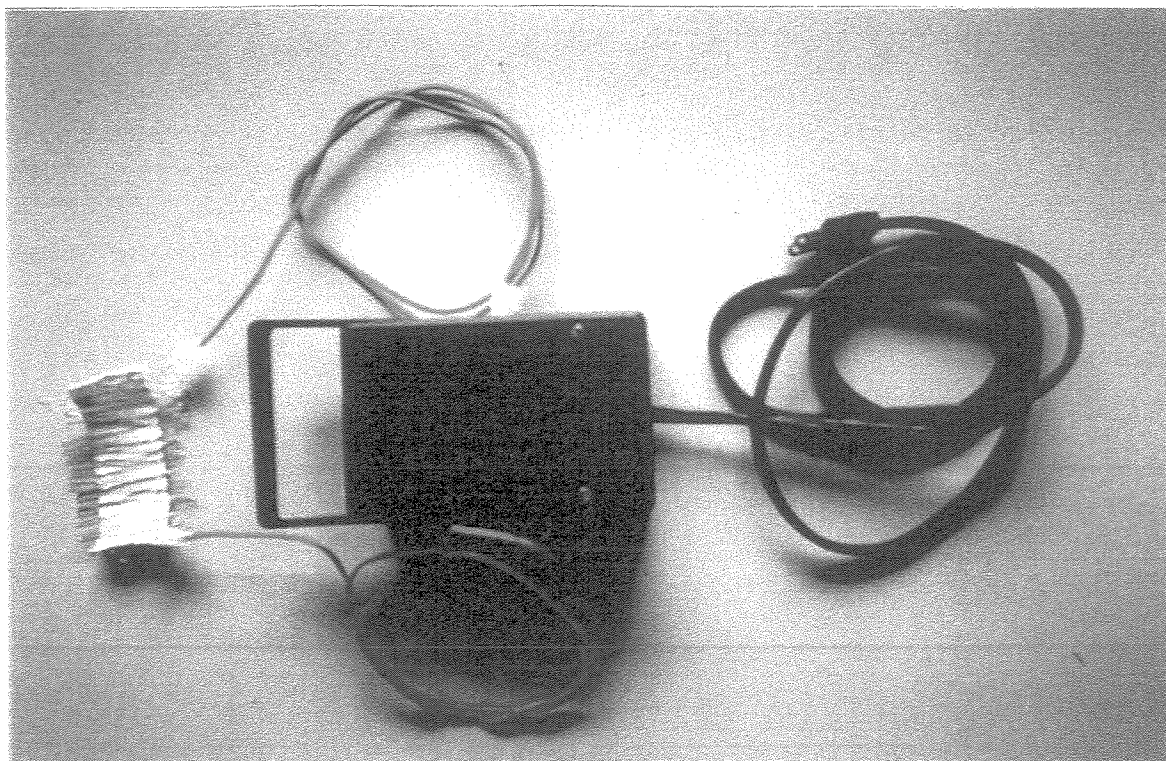


Figura 28 – Fonte de alimentação e resistência elétrica (primeiro formato)

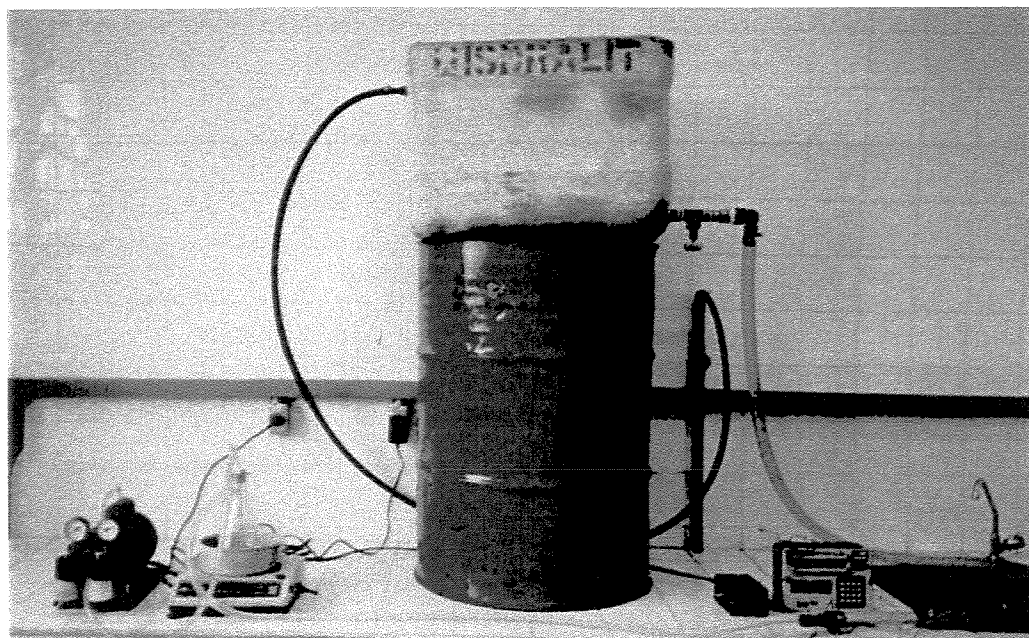


Figura 29 – Esquema de montagem para ensaio em laboratório com balança de precisão



Figura 30 – Sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida instalado em um caule de cana-de-açúcar existente no evapotranspirômetro.