

TRANSPIRÔMETRO - PRINCÍPIOS TEÓRICOS E VIABILIDADE TÉCNICA¹

DULCÍDIO DE SOUZA MANGUEIRA² e ALAIN M.B. PASSERAT DE SILANS³

RESUMO - Este trabalho apresenta o protótipo de um aparelho capaz de medir o fluxo de seiva que atravessa a seção transversal do caule da cana-de-açúcar, acompanhando, dessa forma, a evolução diurna da transpiração da planta. O princípio de funcionamento do aparelho baseia-se na aplicação do balanço de energia a um segmento do caule, aquecido por uma resistência elétrica. O fluxo de calor aplicado no caule dissipa-se em forma de calor condutivo e convectivo, sendo este último proporcional ao fluxo da seiva. Esses diferentes fluxos de calor são determinados por medições de temperatura por microtermopares, cujo sinal é recuperado por um conversor A.D., em microcomputador. Estudou-se a sensibilidade de resposta do aparelho a diversos fatores. Os valores experimentais são, também, comparados aos valores fornecidos por um modelo teórico da distribuição de temperatura no caule. Conclui-se pela viabilidade do uso do aparelho.

Termos para indexação: fluxo de seiva, cana-de-açúcar, transferência de calor, balanço de energia.

A TRANSPIROMETER - THEORETICAL PRINCIPLES AND TECHNICAL FEASIBILITY

ABSTRACT - In this paper an apparatus for measuring sap flow in an intact sugarcane plant, i.e. for measuring daily transpiration of the plant, is described. Principles of this apparatus are based on heat balance equation applied on an electrically heated slide of the plant. Heat flux is dissipated in axial conductive and convective fluxes, the latter being proportional to the sap flux. Heat fluxes are calculated from thermo-couple measurements from which electrical signals are registered in an A.D. conversor into a microcomputer. Sensibility of the apparatus is studied regarding several factors. Experimental values are compared with theoretical ones from a temperature dissipation model. We concluded on the feasibility of the apparatus.

Index terms: sap flow, sugarcane, heat transfer, energy balance.

INTRODUÇÃO

Atualmente, estão sendo desenvolvidos modelos complexos de transferência da água do solo para a planta e da planta para a atmosfera (Katerji & Hallaire, 1984; Sellers et al., 1986). A extração racinária e a difusão do vapor de água dos estômatos das folhas da planta são geralmente parametrizadas

nestes modelos, e, por consequência, necessitam de calibração. Esta, em condições ambientais naturais, só é possível se se medir, *in loco*, o consumo de água de uma única planta.

Este trabalho apresenta a técnica desenvolvida no Laboratório de Hidráulica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, para medir o fluxo de seiva que atravessa a seção transversal do caule da planta. O fluxo de seiva é idêntico à transpiração da planta, ou seja, ao consumo de água da planta, nas horas em que ela não acumula água nos tecidos. O protótipo de um transpirômetro foi instalado com essa finalidade. Baseia-se na aplicação do balanço de energia a um segmento do caule da planta, que é aquecido por uma resistência elétrica envoltória. O método foi proposto recentemente

¹ Aceito para publicação em 8 de março de 1995.

² Eng. Coord. de Irrigação e Recursos Hídricos. Estado da Paraíba
Rua João da Mata, 400, Centro CEP 58013-920
João Pessoa, PB.

³ Ing., Dr. Prof., INPG Grenoble - França. Centro de Tecnologia - Univ. Fed. da Paraíba CEP 58013-920
João Pessoa, PB.

te por Sakuratani (1981, 1984), que aplicou o método em pés de cana-de-açúcar e em pés de tomate. Nesses trabalhos, as plantas utilizadas foram instaladas em lisímetros ou em pequenos recipientes localizados em casas de vegetação, isto é, em condições ambientais controladas. No entanto, o autor não relata a repartição dos diversos fluxos de calor envolvidos, o que, como será visto, caracteriza a sensibilidade do aparelho, nem menciona a ordem de grandeza das diferenças de temperatura.

Neste trabalho, são apresentados os fundamentos teóricos do método, os detalhes construtivos do protótipo testado e a análise dos testes realizados com o protótipo, exposto às condições atmosféricas naturais. O protótipo foi construído e testado para medir o consumo de água da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

A Fig. 1 apresenta, esquematicamente, o aparelho. Aplicando-se a equação do balanço de energia ao volume AA' BB', encontra-se a seguinte equação:

$$q = q_r + q_e + q_s + \Gamma \quad (1)$$

onde:

- q representa o fluxo de calor condutivo radial que penetra no volume AA' BB' através da superfície externa (watts);
- q_e e q_s representam, respectivamente, o fluxo de calor condutivo que penetra pela seção transversal AA' e o que sai pela seção BB' (watts);
- q_r representa o fluxo de calor transportado pela seiva entre as seções AA' e BB' (watts).
- Γ representa a quantidade de calor armazenada no volume de controle por unidade de tempo (watts). Em regime permanente, $\Gamma = 0$.

Cada termo da Equação 1 pode ser expresso separadamente, como mostrado a seguir:

a) O fluxo de calor condutivo radial é dado pela expressão:

$$q = Q - q_1 \quad (2)$$

Q representa o fluxo aplicado pela resistência elétrica:

$$Q = RI^2 \quad (3)$$

e q_1 é o fluxo de calor perdido lateralmente através do isolante que envolve a resistência (Fig. 2). Considerando este fluxo como radial e condutivo puro (Fig. 6), q_1 se escreve:

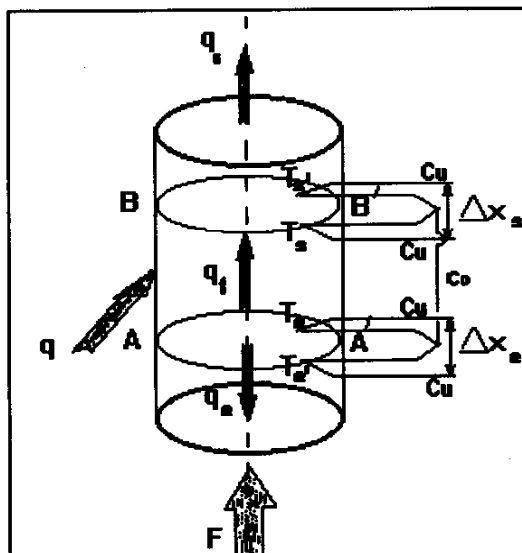


FIG. 1. Representação esquemática do sistema de medição; posicionamento dos sensores.

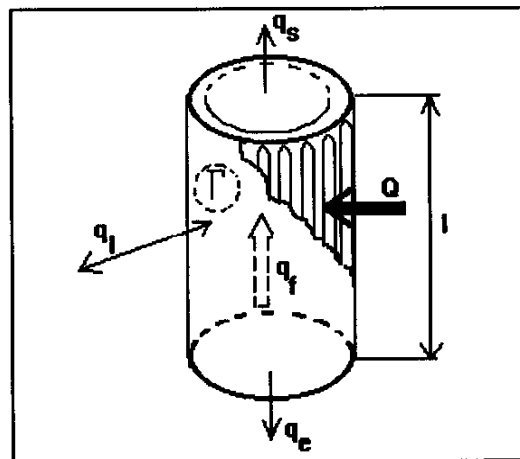


Fig. 2. Representação dos fluxos de calor.

$$q_1 = \frac{2\pi kL(T_r - T_i)}{\ln(r_i/r_o)} \quad (4)$$

sendo k a condutividade térmica do isolante; T_r a temperatura da resistência; T_i a temperatura medida dentro do

isolante à distância r_i do eixo da cana-de-açúcar; e r_0 o raio interno do isolante.

b) Os fluxos longitudinais de calor são dados pelas expressões:

$$q_e = \frac{\lambda A_e (T_e - T_c)}{\Delta x_e} \quad e \quad q_s = \frac{\lambda A_s (T_s - T_c)}{\Delta x_s} \quad (5)$$

T_e e T_s são as temperaturas medidas às distâncias Δx_e e Δx_s , respectivamente, das temperaturas T_c e T_b , que, por sua vez, são medidas nas seções AA' e BB'. (No experimento $\Delta x_e = \Delta x_s = 0,002$ m). λ é a condutividade térmica da cana-de-açúcar. Sakuratani (1981,1984) estimou a condutividade térmica da cana-de-açúcar a partir da combinação das condutividades térmicas da água, da celulose e do ar que compõem os tecidos celulares de uma seção transversal da cana-de-açúcar. Encontrou valores que variavam de 0.52 a 0.58 W.m⁻¹.°K⁻¹, com média de 0.54 W.m⁻¹.°K⁻¹.

c) Para determinar o fluxo de calor transportado pela seiva, aplica-se a primeira lei da Termodinâmica ao volume de controle limitado pelas seções transversais AA' e BB'. A Equação 6, a seguir, é estabelecida, considerando que o fluido é incompressível, que não existe fonte de calor internamente ao volume de controle e desprezando a influência dos gradientes de temperatura sobre o fluxo da seiva:

$$q_f = \rho \cdot F \cdot C (T_s - T_e) \quad (6)$$

onde F é o fluxo de seiva (m³/s), C é o calor específico (4.18 KJ/Kg°K) e ρ a massa específica ($\rho = 1000$ kg/m³).

Combinando as equações 4, 5 e 6 com a Equação 1, deduz-se a Equação 7, que permite calcular o fluxo de seiva a partir das medições das diferenças de temperaturas ($T_e - T_c$); ($T_s - T_c$); ($T_s - T_e$) e ($T_r - T_i$).

$$F = \frac{Q \cdot \frac{\lambda A_e (T_e - T_c)}{\Delta x_e} - \frac{\lambda A_s (T_s - T_c)}{\Delta x_s} - \frac{2\pi kL(T_r - T_i)}{\ln(r_i/r_0)}}{\rho C (T_s - T_e)} \quad (7)$$

Nesta equação, as temperaturas T_e , T_c , T_s e T_r representam uma temperatura média da seção transversal. Como tais temperaturas são medidas pontualmente, há necessidade de se conhecer a relação entre temperatura média e temperatura local em cada seção transversal de medição. Esta relação é dada pela resolução das equações diferenciais com base no transporte simultâneo de calor e massa na cana-de-açúcar.

Considerando a seiva como um fluido incompressível e estabelecendo a equação de energia em um volume de controle infinitesimal em regime permanente, obtém-se (Bejan, 1984):

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (8)$$

onde T representa o campo de temperatura. Explicitando esta equação em coordenadas cilíndricas, considerando que existe simetria axial do escoamento e que não há fluxo radial de seiva, a Equação 8 se escreve:

$$v_x \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (9)$$

onde $\alpha = \lambda/\rho C$ é a difusividade térmica e v_x é a componente longitudinal da velocidade.

Nesta equação, o membro da esquerda representa o transporte de calor por convecção, enquanto o da direita representa o termo condutivo com as suas componentes longitudinais e radiais. Admitindo que o diâmetro da cana-de-açúcar não varia longitudinalmente, a componente v_x será apenas função de r, $v_x = v_x(r)$. O fluxo de seiva dentro da cana-de-açúcar se processa dentro de inúmeros tubos capilares - os tubos vasculares - com interconexões entre si, através de perfurações em suas paredes (Fig. 3). Por esse motivo, o escoamento de seiva pode ser comparado a

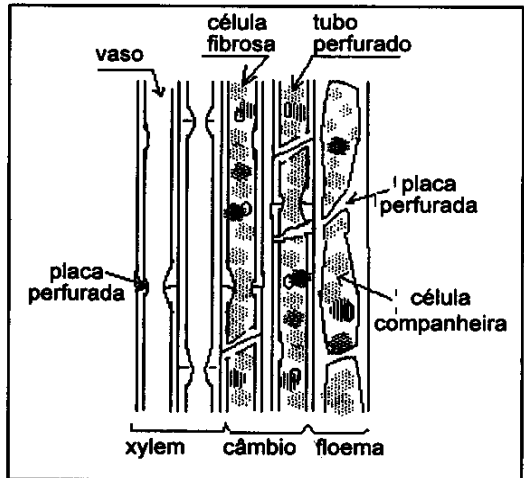


FIG. 3. Seção longitudinal do caule, mostrando os tubos vasculares. Fonte: Devlin (1970).

um escoamento do tipo pistão, isto é, processa-se na mesma velocidade, em toda a seção transversal. Chamando de F , o fluxo de seiva, a Equação 9 se escreve:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{F}{A} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (10)$$

em que A é a área da seção transversal. Admitindo que o escoamento seja estabelecido, o que se traduz, na prática, por uma afinidade entre os perfis de temperatura no sentido longitudinal, a Equação 10 pode ser adimensionalizada por uma função ϕ :

$$\phi\left(\frac{r}{r_0}\right) = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_m} \quad (11)$$

onde:

- T_0 representa a temperatura na parede da cana-de-açúcar;
- T representa o campo de temperatura $T(x, r)$;
- T_m representa a temperatura média na seção transversal, função apenas de x ;
- $\phi(r/r_0)$ é uma função desconhecida que representa a forma do perfil radial de temperatura.

Admitindo que T_0 é constante ao longo da parede, e escrevendo $\theta = T_0 - T_m$, a Equação 10 reduz-se a um sistema de duas equações diferenciais:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{F}{A} \frac{d\theta}{dx} = K_1 \theta \quad (12a)$$

e

$$K_1 = -\frac{1}{r_0} \left(\frac{1}{r_0} \frac{\phi''(R)}{\phi(r)} + \frac{1}{r} \frac{\phi'(R)}{\phi(r)} \right) \quad (12b)$$

sendo $R = r/r_0$.

A formulação e a solução dessas equações são detalhadas em Mangueira (1990). A função adimensional $\phi(R)$ obtida está representada na Fig. 4. Na Equação 11, nota-se que a temperatura T será igual à temperatura média na seção, quando $\phi(R)$ for igual a 1, o que corresponde a um valor $R = 0.683$. Nesse ponto, a derivada $\phi'(R)$ toma o valor $-2,892$, o que permite calcular a constante K_1 :

$$K_1 = 14.458 \text{ m}^{-2}, \text{ considerando } r_0 = 0,02 \text{ m.}$$

Estudo experimental

Dez pés de cana-de-açúcar foram plantados em um lisímetro de nível freático constante, alimentado por um

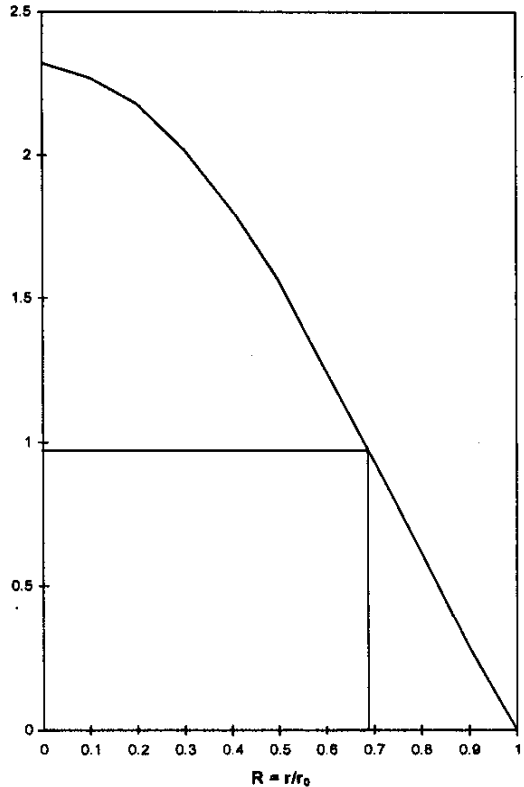


FIG. 4. Função $\phi(R)$.

recipiente de Mariotte. Um tensiômetro foi instalado com 0,20 m de profundidade, e a altura do nível freático foi regulada de modo a tornar constante sua leitura ao longo do experimento, a fim de garantir a não-variação do nível de água dentro do solo. O solo permaneceu com a saturação natural ao longo de todo o experimento e foi coberto por folha de plástico para permitir que somente as plantas transpirassem. Embora os pés de cana-de-açúcar tenham sofrido desenvolvimento diferenciado, um, aproximadamente no meio deles, foi escolhido para ser equipado com o aparelho.

O aparelho compunha-se de uma resistência elétrica de fio de constantan ($d = 0.00025$ m), repartida em duas camadas de espiras longitudinais colocadas sobre uma fita crepe, que garantia aderência ao tronco, ao mesmo tempo que, conferia o mínimo de elasticidade necessário ao acompanhamento do crescimento do caule da cana-de-açúcar (Fig. 5). As espiras foram distribuídas uniformemente de

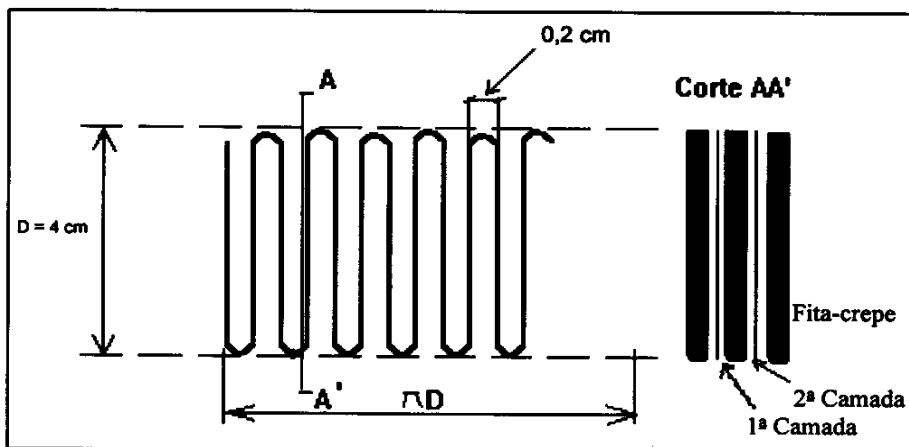


FIG. 5. Detalhes da resistência elétrica de aquecimento.

modo a respeitar a hipótese de temperatura constante na superfície externa da cana-de-açúcar. Uma camada de fita poliéster envolveu esta resistência (de resistividade $\rho = 7,7 \cdot 10^{-7} \Omega/m$), para garantir a impermeabilização do sistema. Esse conjunto ficou sob um isolante cilíndrico de isopor (Fig. 6). Foram testados dois isolantes de espessura diferente: o isolante nº 1, com espessura de 0,055 m, e

o de nº 2, de 0,030 m. As diferenças de temperaturas ($T_e - T_c$), ($T_s - T_a$) e ($T_s - T_c$) foram medidas por termopares Cu-Co em paralelo, como esquematizado na Fig. 1. Os termopares foram introduzidos radialmente na cana-de-açúcar, a uma profundidade aproximada daquela em que se mede a temperatura média da seção transversal. As distâncias entre termopares Δx_e e Δx_s foram, ambas, iguais a 0,002 m. Os diâmetros dos fios de cobre e de constantan mediam de 0,00025 m. Sua solda formava uma ponta quente de aproximadamente 0,0006 m de diâmetro. As saídas dos termopares em paralelo, amplificadas eletronicamente, foram ligadas, por um fio blindado, a uma placa de aquisição A-D de 12 bits e 16 canais, instalada em microcomputador IBM/PC. Para evitar ruídos, as blindagens dos fios foram aterradas, e as soldas entre os fios de cobre do termopar e os fios de transmissão do sinal foram mantidos à temperatura constante de 0 °C, em garrafa térmica, durante toda a experimentação. Da mesma forma, foram instalados os termopares Cu-Co, um por baixo da resistência elétrica, fornecendo a temperatura T_r , e outro dentro do isolante, a uma distância r_i ($r_i = 0,033$ m, para os dois isolantes testados) do eixo da cana-de-açúcar. Os valores das temperaturas e as diferenças de temperaturas foram registrados com intervalo de 1 hora.

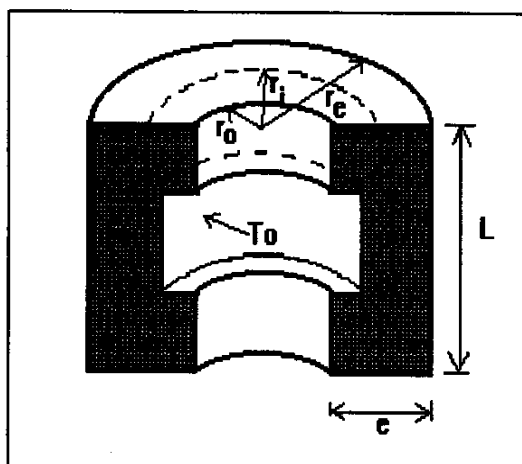


FIG. 6. Corte longitudinal do isolante:
 r_i = distância ao eixo onde é medida T_i ;
 r_e = raio externo do isolante;
 r_0 = raio interno do isolante aonde é medida a temperatura T_0 .

Para ilustrar e verificar o correto funcionamento do aparelho, outras medições foram efetuadas na área de experimentação: medições da temperatura ambiente, da radiação solar global e dos volumes de água precipitada.

O procedimento experimental foi estabelecido, considerando um estudo minucioso inicial da precisão da me-

dição do sistema de Mariotte em função do efeito da temperatura ambiental e a pré-avaliação do tempo de resposta do aparelho (Mangueira, 1990). As medições foram, de um modo geral, efetuadas entre 6h30 e 18h30, com frequência horária. O consumo do lisímetro era lido apenas duas vezes ao dia, no início e no final da experimentação. Dois períodos de medições foram efetuados nesses testes, correspondendo aos dois tipos de isolantes: com o isolante nº 1, nos dias 5, 8, 21, 22 e 23 de março de 1990, e, com o isolante nº 2, nos dias 30 de março e 3 e 10 de abril de 1990.

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste trabalho, foram analisadas, experimentalmente, as seguintes características do aparelho: o tempo de resposta, a precisão das medições e a sensibilidade.

Determinação do tempo de resposta do aparelho

A fim de avaliar o tempo de resposta do aparelho, dois experimentos foram conduzidos. No primeiro, dois casos foram considerados com o aparelho provido do mesmo isolante. No primeiro caso, a resistência elétrica foi ligada às 5h30 da manhã, e no segundo, deixou-se, propositadamente, a resistência ligada por toda a noite. Os valores dos fluxos de seiva calculados pela Equação 7 estão representados na Fig. 7. Nota-se uma diferença significativa dos fluxos de seiva calculados antes das 7 horas. No primeiro caso, em que a resistência foi ligada às 5h30 da manhã, o valor do fluxo de seiva calculado às 6h30 da manhã não confere com a realidade. Isso se deve ao valor muito pequeno da diferença de temperatura ($T_s - T_e$) que na Equação 7 aparece no denominador. Esse valor anormal de diferença de temperatura às 6h30 da manhã se deve ao fato de a distribuição de temperatura no interior do caule da cana-de-açúcar não se encontrar ainda estabelecida, fato não observado no caso em que a resistência ficou ligada por toda a noite.

No segundo experimento, foram considerados dois isolantes diferentes e observou-se entre 8 e 9 horas da manhã, a evolução da temperatura da resistência elétrica. O horário escolhido deveu-se ao

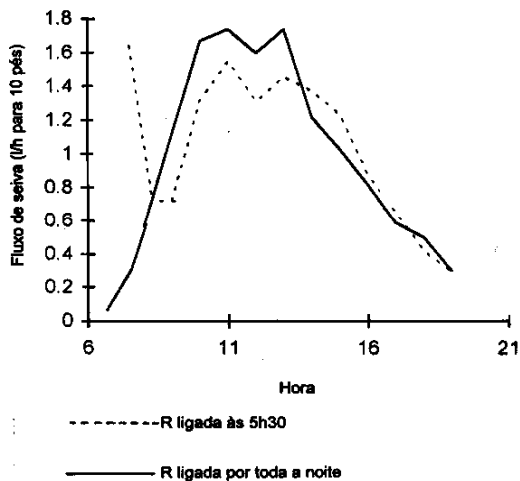


FIG. 7. Evolução comparativa do fluxo de seiva.

fato de estar distanciado suficientemente do horário em que a resistência era normalmente ligada e, ao mesmo tempo, de ser cedo o bastante para que o fluxo de seiva variasse pouco e para que as condições ambientais não sofressem grandes variações. Os resultados estão plotados na Fig. 8. A resistência elétrica foi ligada exatamente dez minutos após ter-se iniciada a aquisição. Com os dois isolantes utilizados, observou-se a obtenção de um patamar indicativo de um regime térmico estabelecido. Para o isolante 1, o mais espesso, foram necessários 40 minutos para se atingir esse patamar; enquanto, para o isolante 2, foram precisos 50 minutos. É evidente que o tempo de resposta da resistência elétrica diminuiria sensivelmente, se os valores do fluxo de seiva fossem maiores; porém não seria mensurável, porque o fluxo variaria. De qualquer forma, o valor obtido mostrou-se elevado, significando que, com o protótipo proposto, medições do fluxo de seiva com frequência inferior a uma hora não são recomendáveis. Da mesma forma, os resultados obtidos com ambas as experiências mostram que, se a resistência elétrica for ligada às 5h30 da manhã, os fluxos de seiva deverão ser calculados a partir das 7 horas.

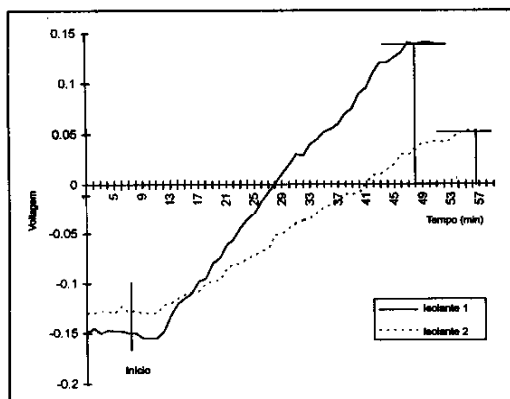


FIG. 8. Tempo de resposta do aparelho.

Estimação da precisão das medições

Na Tabela 1, estão consignados os valores dos volumes medidos entre 7 e 19 horas, pelo aparelho e a variação do volume de água no tambor de alimentação do sistema, no mesmo horário.

O volume do fluxo de seiva medido pelo aparelho foi multiplicado por dez, para ser comparado com o valor consumido indicado pelo tambor, tendo em vista que dez unidades tinham sido plantadas no lisímetro. Como os pés de cana tiveram desenvolvimento diferenciado e diâmetros diferentes, esse valor deve ser considerado aproximado. Nos dias 21/3/90 e 3/4/90, ocorreram precipitações durante a

noite. Assim, para aqueles dias, o segundo valor que aparece na Tabela 1 corresponde ao valor medido corrigido do volume precipitado.

Os valores obtidos pelo aparelho nos dias 5 e 8 de março são pequenos quando comparados aos demais. Uma análise sucinta dos resultados mostra que, naqueles dias, os valores dos fluxos de calor condutivos longitudinais foram elevados, levando a uma estimativa de baixos valores do fluxo de calor transportado pela seiva. Provavelmente, tal fato se deve à necessidade de os tecidos da planta se acomodarem em torno dos termopares, já que em ambos os casos, a montagem fora feita na véspera. Eliminando estes valores, constata-se um erro sistemático na estimação do fluxo de seiva pelo aparelho, quando comparado aos valores indicados pelo sistema de alimentação.

Uma das características que garante o real funcionamento do aparelho pode ser observada pelas curvas plotadas na Fig. 9, em que se compara a evolução diurna do fluxo de seiva com a evolução da radiação solar global e da temperatura ambiente. Observa-se que o fluxo de seiva evolui com o aumento da radiação solar, diminuindo entre 11 e 13 horas, quando a radiação solar atinge seu ponto mais alto. Este fenômeno é peculiar à cana-de-açúcar, que tende a fechar seus estômatos à radiação solar direta. Tal fenômeno foi observado por Sakuratani (1984), que constatou que a menor proporção de radiação

TABELA 1. Comparação entre os volumes diários transpirados pelas dez canas-de-açúcar, medidos pelo aparelho e consumidos no lisímetro.

Isolante nº 1			Isolante nº 2		
Dia	Varição no lisímetro (ℓ)	Volume medido pelo aparelho (ℓ)	Dia	Varição no lisímetro (ℓ)	Volume medido pelo aparelho
5/3/90	7,63	5,9	30/3/90	-	-
8/3/90	10,34	4,5	3/4/90	4,43 - 7,15	8,42
21/3/90	5,91 - 7,00	12,3	10/4/90	8,87	7,60
22/3/90	7,40	13,0			
23/3/90	6,90	12,3			

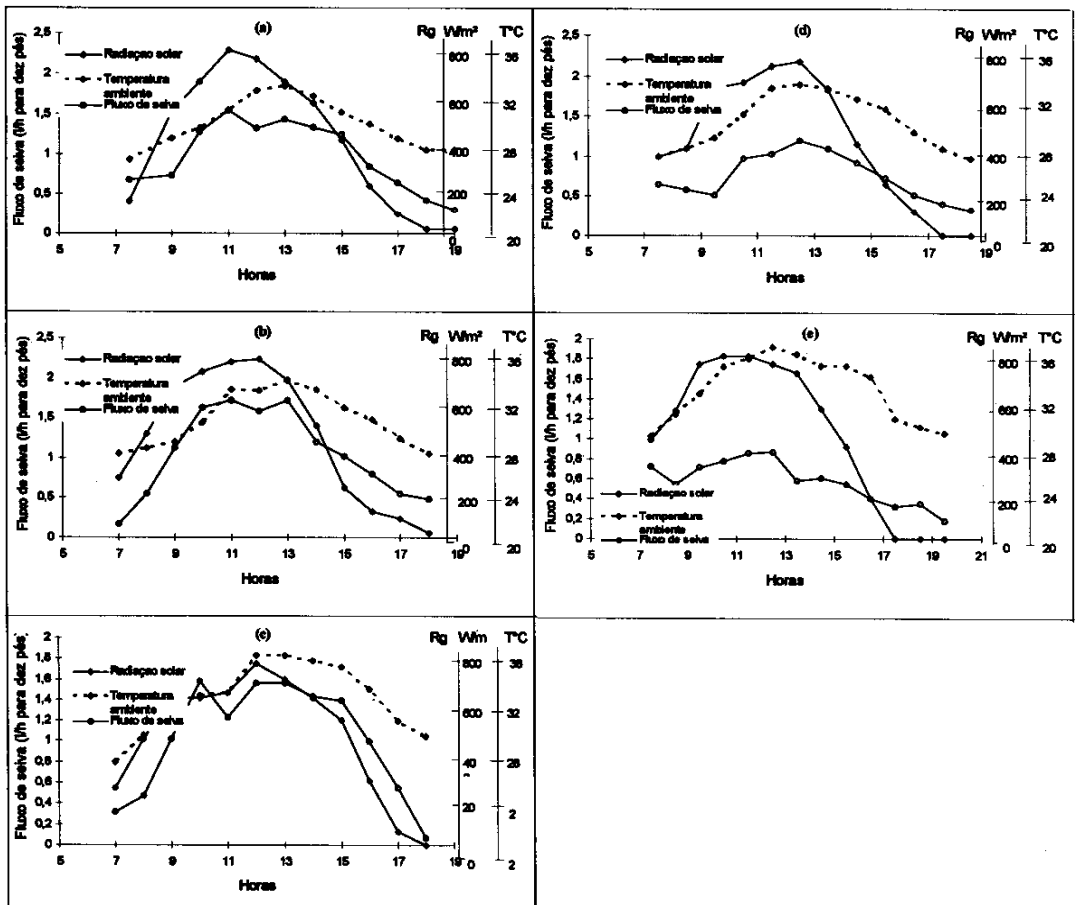


FIG. 9. Evolução comparada entre fluxo de seiva, radiação solar e temperatura ambiente em: (a) 21/3/90, (b) 22/3/90, (c) 23/3/90, (d) 3/4/90, (e) 10/4/90.

difusa em relação à radiação global corresponde, proporcionalmente, à menor transpiração da cana-de-açúcar.

O correto acompanhamento da evolução da radiação solar foi indicativo do desempenho adequado do aparelho, já que a transpiração da cana-de-açúcar não sofreu restrições em razão da disponibilidade de água do solo. Os valores de transpiração me-

didados pelo sistema se apresentaram bastante diferentes dos valores medidos no sistema de alimentação (Tabela 1). Embora estes últimos correspondam, no nosso experimento, a valores aproximados, é necessário analisar as várias fontes de erros. Duas merecem atenção particular. A primeira consiste em determinar a sensibilidade do cálculo do fluxo ao valor da condutividade térmica. O valor medido no

nosso experimento (Mangueira, 1990) é de 0,62 W/m²K, ou seja, é 15% mais alto do que o valor encontrado por Sakuratani (1984). A segunda é calcular, com precisão, os gradientes:

$$(T_c - T_e) / \Delta x_e \text{ e } (T_s - T_e) / \Delta x_s$$

Embora os termopares paralelos tenham sido fixados na cana com o auxílio de um gabarito, devido ao diâmetro muito pequeno deles e à estrutura porosa e fibrosa da cana-de-açúcar, um erro de 0,0005 m nos valores de Δx_e e Δx_s é perfeitamente concebível.

Na Tabela 2, foram recalculados os valores dos fluxos diários, considerando vários valores plausíveis da condutividade térmica da cana-de-açúcar. Nessa tabela, os resultados estão apresentados para dois dias típicos, um para cada isolante considerado.

Estes valores mostram que o valor diário do fluxo de transpiração não é muito sensível ao valor de λ . Consequentemente, uma precisão muito elevada na determinação do valor da condutividade tér-

TABELA 2. Fluxo de seiva diário calculado para diversos valores da condutividade térmica λ da cana-de-açúcar (em litros, para os 10 pés de cana-de-açúcar)

Dia	Valores de λ (W/m ² K)						
	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64
22/3/90	14,2	14,0	13,7	13,5	13,3	13,0	12,8
03/4/90	9,8	9,6	9,5	9,3	9,2	9,0	8,9

mica é desnecessária, e o processo utilizado neste trabalho (Mangueira, 1990) corresponde perfeitamente às expectativas.

Considerando uma condutividade térmica $\lambda = 0,62$ W/m²C, foram calculados os valores de fluxos diários transpirados para vários valores de $\Delta x_e = \Delta x_s$, que levam aos resultados apresentados na Tabela 3.

Desta vez, o valor calculado para o consumo diário mostra-se muito sensível à precisão na instala-

ção dos termopares. O tamanho da ponta quente dos termopares e a dificuldade já mencionada em

TABELA 3. Fluxo de seiva diário calculado para vários valores de Δx (em litros, para dez pés de cana-de-açúcar).

Dia	Valores de Δx (mm)					
	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62
22/3/90	14,2	14,0	13,7	13,5	13,3	13,0
3/4/90	9,8	9,6	9,5	9,3	9,2	9,0

posicioná-los devem explicar o erro sistemático encontrado. O valor diferente do erro com o isolante 1 e com o isolante 2 se explica, então, pela necessária reinstalação do equipamento na da mudança do isolante.

É agora necessário verificar, pela comparação com os resultados teóricos, se os valores de diferenças de temperatura medidos ao longo do experimento estão dentro da faixa esperada. A solução do problema é detalhada em Mangueira (1990) e leva à seguinte equação:

$$\theta = C_0 \exp(\beta x)$$

onde C_0 é determinado pela equação:

$$q = -2\pi\lambda C_0 (\exp(\beta L) - 1) / \beta$$

onde L é o comprimento da luva de aquecimento e β é determinado pela equação:

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{F}{A\alpha} - \sqrt{\frac{F^2}{A^2\alpha^2} + 4K_1} \right)$$

A comparação direta com os valores experimentais não é possível, pois o valor q não é conhecido. Porém, durante o dia, q varia entre 0,8 e 1,0 watts, sendo menor pela manhã e ao anoitecer. Na Fig. 10, são comparados os valores medidos com as curvas teóricas calculadas com $q = 1$ e $q = 0,8$ respectivamente. A comparação é satisfatória.

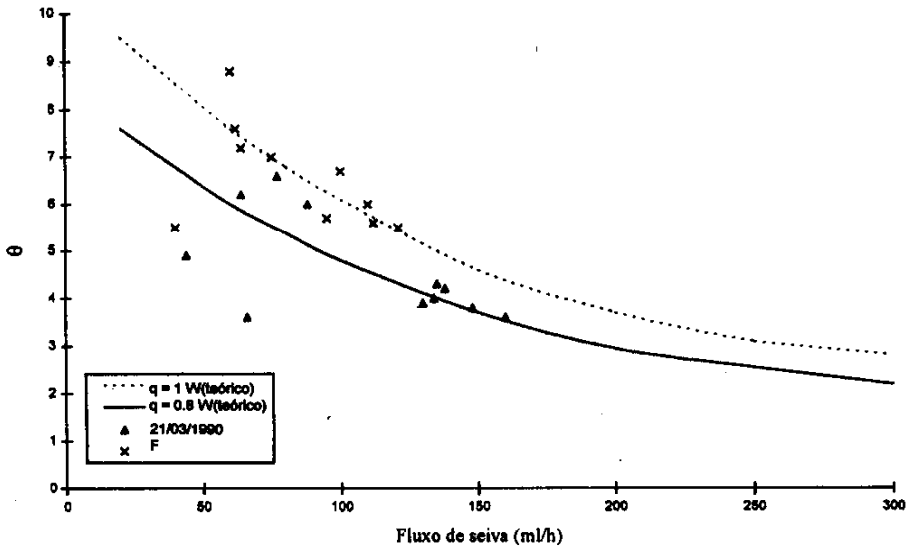


FIG. 10. Comparação da distribuição dos valores teóricos e experimentais de temperatura.

Estudo da sensibilidade do aparelho

A comparação entre a evolução do fluxo de seiva e a evolução da radiação solar (Fig. 9) já é indicativa da sensibilidade do aparelho. A Equação 4 mostra que o fluxo de calor convectivo é proporcional ao fluxo de seiva. Logo, o aparelho será tanto mais sensível quanto maior a proporção do fluxo de calor convectivo em relação aos demais. A Tabela 4 apresenta a repartição percentual dos fluxos de calor para vários dias de experimentação, com os dois isolantes. A observação dessa tabela leva às seguintes constatações:

1. O fluxo de calor perdido lateralmente q_l varia em torno de 20% nos horários em que o fluxo de seiva se encontra estabelecido. É mínimo ao meio dia, quando a temperatura ambiente é máxima, o que corresponde a uma temperatura mínima da resistência elétrica. Torna-se bem mais elevado pela manhã e ao anoitecer, quando a transpiração da planta é mínima ou quase nula. O mesmo comportamento foi constatado com os dois isolantes, e não foram notadas grandes diferenças dessa perda no o isolante mais espesso.

2. O fluxo de calor perdido por condução longitudinal $q_{s/e}$ está relacionado com o fluxo de seiva,

sendo máximo quando o fluxo de seiva é mínimo, e vice-versa.

3. O fluxo de calor transportado pelo fluxo de seiva, q_f , representa, em nossos experimentos, uma média superior a 52%, valor considerável se forem considerar as várias perdas possíveis. O aparelho demonstra ser absolutamente sensível às variações do fluxo de seiva, e o calor por ele transportado representa a maior fração no balanço de energia.

Convém, ainda, comparar a sensibilidade do aparelho com os dois isolantes testados. Para se tornar comparável, já que as condições climáticas foram diferentes nos experimentos com cada isolante, traçou-se, na Fig. 11, as curvas adimensionalizadas:

$$q_{f\%} = f\left(\ln\left(\frac{\rho_{\text{Lat}} \cdot F}{AR_g}\right)\right)$$

onde:

- $q_{f\%}$ representa a percentagem do calor aplicado, transportado pela seiva;
- $\frac{\rho_{\text{Lat}} \cdot F}{AR_g}$ é um produto adimensional, que representa o quociente de energia utilizada no processo de evaporação da água através da transpiração, pela energia solar fornecida à planta;

TABELA 4. Repartição percentual dos fluxos de calor.

Isolante 1									Isolante 2							
21/3/90			22/3/90			23/3/90			3/4/90			10/4/90				
Hora	q _{se}	q _t	q _r	q _{se ou e}	q _t	q _r	q _{se ou e}	q _t	q _r	Hora	q _{se ou e}	q _t	q _r	q _{se ou e}	q _t	q _r
7h	-	-	-	44,4	35,7	19,9	40,9	43,1	16,0	6h30	46,3	17,4	36,3	50,6	18,7	30,7
7h30	55,7	15,3	29,0	-	-	-	-	-	-	7h30	46,7	22,5	30,8	49,5	22,0	28,5
8h	-	-	-	12,8	23,2	36,0	13,2	37,3	49,5	8h30	27,2	24,3	48,5	35,2	23,2	41,62
9h	31,1	12,4	56,5	21,4	17,6	61,0	05,4	20,3	74,3	9h30	24,9	21,0	54,1	15,2	18,2	66,6
10h	28,8	6,9	64,3	21,4	13,3	65,3	16,0	17,9	66,1	10h30	12,5	10,5	77,0	19,9	12,0	68,1
11h	28,4	8,4	63,6	23,0	15,6	61,4	16,7	22,7	60,0	11h30	14,0	12,6	73,4	18,2	12,6	69,2
12h	31,1	8,9	60,0	21,0	16,3	62,7	12,5	16,3	71,2	12h30	9,7	10,8	79,5	21,9	16,2	61,9
13h	27,3	8,4	64,3	16,4	17,6	66,0	12,8	22,2	65,0	13h30	12,5	14,4	71,1	34,3	17,4	48,3
14h	22,6	12,2	65,2	21,4	22,4	56,2	11,6	19,9	68,5	14h30	18,3	19,1	62,6	29,6	19,0	51,4
15h	28,4	15,7	55,9	20,6	25,7	53,7	13,2	24,0	62,8	15h30	17,5	23,0	59,5	30,6	20,8	48,6
16h	23,8	17,5	58,7	20,6	24,5	54,9	21,4	24,5	54,1	16h30	25,3	26,6	48,1	37,3	28,4	34,2
17h	30,4	24,1	45,5	30,0	30,6	39,4	32,3	35,8	31,9	17h30	42,1	34,2	23,7	44,9	34,8	20,3
18h	46,7	29,3	24,0	35,4	36,2	28,4	54,9	40,9	4,2	18h30	46,0	37,3	16,7	47,5	36,9	15,6
19h	52,2	32,1	15,7	-	-	-	-	-	-	19h30	-	-	-	55,7	38,2	6,1

• Lat é o calor latente de vaporização da água.

Na Fig. 11, notam-se as formas similares das duas curvas e a proximidade das abscissas dos picos das curvas. Nota-se também que, com o isolante 2, o pico apresenta-se muito acima do pico do isolante 1, o qual traduz, então, uma maior sensibilidade do sistema com o isolante 2, nos horários em que a transpiração é mais forte.

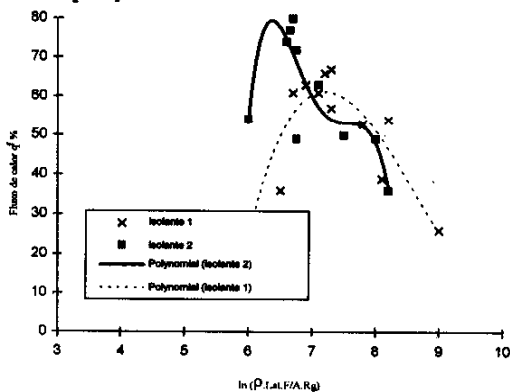


FIG. 11. Sensibilidade do aparelho aos dois isolantes.

CONCLUSÕES

1. A sensibilidade do aparelho desenvolvido neste trabalho permitiu a avaliação, pelos fluxos medi-

dos, da evolução diurna dos parâmetros micrometeorológicos; porém os valores diários da transpiração diferem sistematicamente dos valores obtidos pelo sistema de controle.

2. Os valores medidos das temperaturas nas diferentes seções transversais instrumentadas concordam com valores calculados a partir de um modelo teórico.

3. Um estudo específico mostra que os valores de fluxos de seiva medidos por esse aparelho são relativamente pouco sensíveis à precisão sobre o valor da condutividade térmica da cana-de-açúcar.

4. Este estudo mostra que o resultado é muito sensível à posição dos termopares. O erro sistemático encontrado nos valores diários de transpiração, quando comparados com os valores dos volumes medidos no recipiente de alimentação, deve ser atribuído a um erro no posicionamento dos termopares, levando a uma sobreestimação das distâncias Δx_c e Δx_s .

5. O tempo de resposta do aparelho, tal como apresentado neste trabalho, pode atingir valores ligeiramente inferiores a 1 hora, não permitindo, desse modo, medições com frequência superior à frequência horária.

6. Há necessidade de se diminuir sensivelmente o tamanho da ponta quente dos termopares, para

minimizar-lhe o erro de posição e diminuir o tempo de acomodação dos tecidos da cana-de-açúcar a sua volta.

REFERÊNCIAS

- BEJAN, A. *Convection heat transfer*. New York: John Wiley & Sons, 1984. 477 p.
- DEVLIN, R.M. *Plant physiology*. New York: Reynold Publishing, 1970. 611 p.
- KATERJI, M.; HALLAIRE, M. Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie*, v.4, n.10, p.999-1008, 1984.
- MANGUEIRA, D. de S. *Desenvolvimento de um sistema de medição de fluxo de seiva por balanço térmico*. [S.l.]: CPGEM/UFPB, 1990. 94 p. Tese de Mestrado
- SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, v.37, p. 9-17, 1981.
- SAKURATANI, T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. *Journal of Agricultural Meteorology* v.40, n.3, p.273-277, 1984.
- SELLERS, P.J.; MINTZ, Y.; SUD, Y.C.; DALCHER, A. A simple Biosphere Model (SiB) for use within General Circulation Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.43, n.6, p.305-331, 1986.