

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA
A PARTIR DE MEDIDAS DE PROTÓTIPO DE
ESTAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA**

ARMANDO DA SILVA FILHO

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES

Cuiabá, MT, Março de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA
A PARTIR DE MEDIDAS DE PROTÓTIPO DE
ESTAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA

ARMANDO DA SILVA FILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES

Cuiabá, MT, Março de 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

F481e Silva Filho, Armando da.
ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA A PARTIR DE
MEDIDAS DE PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO
MICROMETEOROLÓGICA / Armando da Silva Filho. -- 2015
63 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2015.
Inclui bibliografia.

1. razão de Bowen. 2. fluxímetro. 3. piranômetro. 4. saldo
radiômetro. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.


UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

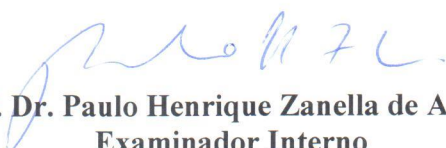
FOLHA DE APROVAÇÃO


TÍTULO: ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA A PARTIR DE
MEDIDAS DE PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO
MICROMETEOROLÓGICA

AUTOR: ARMANDO DA SILVA FILHO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 04 de março de 2015, pela
comissão julgadora:


Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes
Orientador
Instituto de Física – UFMT


Prof. Dr. Paulo Henrique Zanella de Arruda
Examinador Interno
Instituto de Física – UFMT


Prof. Dr. Flávio Teles Carvalho da Silva
Examinador Externo
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT

DEDICATÓRIA

A Deus pela vida.

A esposa e filho pela
paciência.

A minha mãe pela fé.

A meu pai (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

- Ao amigo e orientador, Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes, pela confiança no projeto e suporte acadêmico durante todo esse período.
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira por sua dedicação e empenho ao programa de pós-graduação, e sua preocupação constante com o bem estar dos alunos do programa.
- A Soilce e ao Cesário pela colaboração nos serviços de secretaria, que nos auxiliou para o desenvolvimento deste trabalho
- Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, pela amizade construída nestes anos de trabalho.
- Aos amigos da Unemat pelo incentivo ininterrupto
- Ao CNPQ pelo auxílio financeiro.

SUMARIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIACOES E/OU SIMBOLOS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICATIVA.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. BALANÇO DE ENERGIA.....	3
2.2. SALDO DE RADIAÇÃO.....	4
2.3. FLUXO DE CALOR NO SOLO	4
2.4. FLUXO DE CALOR LATENTE E SENSÍVEL	5
2.5. MÉTODOS DA RAZÃO DE BOWEN	6
2.6. SENSOR TERMOELÉTRICO	7
2.6. SENSOR FOTOVOLTAICO OU QUÂNTICO.....	9
2.7. SENSOR NTC.....	9
2.8. SENSOR CAPACITIVO.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. LOCAL DE ESTUDO	11
3.2. ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS DESENVOLVIDAS	13
3.3. CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DESENVOLVIDOS.....	13
3.4. ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA	15
3.5. CRITÉRIO PARA REJEIÇÃO DOS DADOS INADEQUADOS ESTIMADOS PELO MÉTODOS DA RAZÃO DE BOWEN	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1. DESENVOLVIMENTO DAS ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS	20
4.2.1. Piranômetro Desenvolvido.....	20
4.2.2. Saldo Radiômetro e Fluxmetro de Calor no Solo Desenvolvidos	21
4.2.3. Termohigrômetro e Abrigo Termohigromtrico Desenvolvido.....	23
4.2.4. <i>Datalogger</i> Desenvolvido para Leitura e Armazenamento dos Dados.....	24
4.2. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DESENVOLVIDOS	30
4.3. CUSTO DO DESENVOLVIMENTO DA ESTAÇÃO MICROMETEOROLOGICA	36
4.3. ANÁLISE DAS MEDIDAS COM OS SENSORES DESENVOLVIDOS	37
4.4. ANÁLISE DO BALANÇO DE ENERGIA PELO MÉTODOS DA RAZÃO DE BOWEN.....	39
5. CONCLUSÃO	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática de um Termopar e o efeito Seebeck.	8
Figura 2. Exemplificação de um módulo Peltier comercial.....	8
Figura 3. Representação do efeito fotovoltaico.	9
Figura 4. Curva de resposta do NTC e componente comercial.	9
Figura 5. Sensor capacitivo e sistema de medida.....	10
Figura 6. Localização dos sítios experimentais no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.	11
Figura 7. Foto da área de cana-de-açúcar onde o mastro micrometeorológico foi instalado no Sítio 1 na fazenda Arco-íris, Barra do Bugres, Mato Grosso.	12
Figura 8. Foto da área urbana onde o mastro micrometeorológico foi instalado no Sítio 2, Barra do Bugres, Mato Grosso.	12
Figura 9. (a) Estações micrometeorológicas desenvolvida nesse trabalho e comercial medindo as mesmas condições microclimáticas e (b) fluxo de calor no solo desenvolvido nesse trabalho e comercial colocados na mesma profundidade em uma caixa de areia.....	14
Figura 10. Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície vegetal, mostrando a convenção de sinais. A – fluxo de energia advectiva para o volume de controle acima da superfície; R_n – saldo de radiação; λE e H – fluxos de calor latente e sensível; G – fluxo de calor no solo; Δe e ΔT - diferença de pressão de vapor e temperatura entre os níveis inferior (z_1) e superior (z_2), e $\partial e / \partial z$ e $\partial T / \partial z$ – gradientes de pressão de vapor e temperatura.	18
Figura 11. Etapas de construção do piranômetro usado nas estações micrometeorológicas.	21
Figura 12. Etapas de construção do saldo radiômetro e do fluxímetro de calor no solo usados nas estações micrometeorológicas.	22
Figura 13. Termohigrômetro DHT22 usado nas estações micrometeorológicas.	23
Figura 14. Etapas de construção do abrigo termométrico e fixação do termohigrômetro usado nas estações micrometeorológicas.	24
Figura 15. Microcontrolador 18f452 usado para construção do <i>datalogger</i> das estações micrometeorológicas.	25

Figura 16. Relógio de tempo real ds1302 usado para construção do <i>datalogger</i> das estações micrometeorológicas.....	25
Figura 17. Multiplexador analógico CD4051 usado para construção do <i>datalogger</i> das estações micrometeorológicas.	26
Figura 18. Módulo embarcado PenBSusado para construção do <i>datalogger</i> das estações micrometeorológicas.....	26
Figura 19. Módulos do <i>datalogger</i> das estações micrometeorológicas.	27
Figura 20. Painel solar de 5W utilizado para carregar as baterias das estações micrometeorológicas.	27
Figura 21. Fluxograma do programa do <i>datalogger</i> das estações micrometeorológicas.	29
Figura 22. Variação da radiação solar ao longo dos dias de calibração dos piranômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	30
Figura 23. Regressão linear simples entre os dados medidos pelos piranômetros (a e b) desenvolvidos nesse trabalho (abscissas) e comerciais (ordenadas) instalados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso. ..	31
A figura 24 apresenta o saldo de radiação do saldo radiômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b).....	31
Figura 24. Variação do saldo de radiação ao longo dos dias de calibração do saldo radiômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	31
Figura 25. Regressão linear simples entre os dados medidos pelos saldos radiômetros (a e b) desenvolvidos nesse trabalho (abscissas) e comerciais (ordenadas) instalados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	32
A figura 26 apresenta o fluxímetro de calor do solo protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b).	32
Figura 26. Variação do fluxo de calor no solo ao longo dos dias de calibração dos fluxímetros de calo no solo protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	33

Figura 27. Regressão linear simples entre os dados medidos pelos fluxímetros de calor no solo (a e b) desenvolvidos nesse trabalho (abscissas) e comerciais (ordenadas) instalados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	33
A figura 28 apresenta a temperatura do ar obtido do termohigrômetro protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b).....	34
Figura 28. Variação da temperatura do ar ao logo dos dias de calibração dos termohigrômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	34
Figura 29. Regressão linear simples entre a temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 medidos pelos termohigrômetros protótipos que foram instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.	34
Figura 30. Variação da umidade relativa do ar ao logo dos dias de calibração dos termohigrômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.....	35
Figura 31. Regressão linear simples entre a umidade relativa do ar entre os níveis 1 e 2 medidos pelos termohigrômetros protótipos que foram instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites de aceitabilidade dos valores obtidos pelo método da razão de Bowen sob condições não advectivas, em que Rn é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo, Δe é a diferença entre os níveis superior e inferior, LE é o fluxo de calor latente e H é o fluxo de calor sensível.....	18
Tabela 2. Resumo das classes de erros gerados pelo método da razão de Bowen (Perez et al., 1999), em que $Rn - G$ é a energia disponível, Δe é a diferença entre os níveis superior e inferior, β é a razão de Bowen, T é a temperatura do ar, e é a pressão de vapor, ε é o intervalo de erro que define o intervalo de exclusão dos valores de razão de Bowen, LE e H são os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente.....	19
Tabela 3. Correlação (r), significância (p -valor), coeficiente de Willmott (d), erro médio (EM) e erro médio percentual (EMP) entre as medidas realizadas com os sensores protótipos e os comerciais.	36
Tabela 4. Custo dos sensores e <i>datalogger</i> desenvolvidos.	37
Tabela 5. Custo dos equipamentos importados usados como referência no desenvolvimento da estação micrometeorológica.....	37

LISTA DE ABREVIACÕES E/OU SIMBOLOS

R_n	- Saldo de radiação
H	- Densidade do fluxo de calor sensível
LE	- Densidade de fluxo de calor latente
G	- Densidade de fluxo de calor no solo
P	- Energia utilizada para a realização da fotossíntese.
R_g	- Radiação solar global incidente
P	- Densidade do ar
cp	- Calor específico do ar
γ	- Constante psicrométrica
β	- Razão de Bowen
V	- Tensão gerada
α_{ab}	- Coeficiente Seebeck
T_1	- Temperatura
T_2	- Temperatura
$\mu V/K$	- Micro volts por Kelvin
z_1	- Altura nível 1
z_2	- Altura nível 2
ρ_a	- Densidade média do ar
c_p	- Calor específico do ar seco à pressão constante
k_v	- Coeficiente de difusão turbulenta de vapor d'água
∂e	- Gradiente de pressão de vapor
∂T	- Gradiente de temperatura
k_h	- Coeficiente de difusão turbulenta de calor sensível
∂e	- Gradiente de pressão de vapor
∂T	- Gradiente de temperatura
Δe	- Diferença de pressão de vapor d'água do ar entre dois níveis
ΔT	- Diferença de temperatura do ar entre dois níveis

e_s - Pressão de vapor d'água do ar saturado

UR - Umidade relativa do ar

T - Temperatura do ar

Δz - Diferença altura entre dois níveis

ε - Intervalo de erro que define o intervalo de exclusão dos valores de razão de

Bowen

RESUMO

SILVA FILHO, A. Estimativa do balanço de energia a partir de medidas de protótipo de estação micrometeorológica. Cuiabá, 2015, 63p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A conversão de extensas áreas de Cerrado para culturas agrônomicas e em área urbana modifica o microclima, possível de ser medido pelo balanço de energia. No entanto, os equipamentos micrometeorológicos possuem elevado custo de aquisição. Sendo assim, esta pesquisa tem por objetivo desenvolver uma estação micrometeorológica capaz de medir o balanço de energia pelo método da razão de Bowen em uma área de cana-de-açúcar e em uma área urbana no município de Barra do Bugres, Mato Grosso. Neste trabalho foram desenvolvidos saldo radiômetros, piranômetros, fluxímetros de calor no solo, termohigrômetros e *datalogger*. Esses sensores foram postos para calibração em condições semelhantes à sensores comerciais, e depois instalados em um mastro localizado em uma área de cana-de-açúcar e uma urbana. O balanço de energia foi estimado pelo método da razão de Bowen. As correlações do piranômetro, saldo radiômetro, temperatura do ar, e umidade relativa, foram superiores a $R^2 = 0,98$ e o fluxímetro de calor do solo $R^2 = 0,90$. O custo da estação desenvolvida representou 4,3% do custo de uma estação comercial e a correlação dos sensores desenvolvidos indicam a viabilidade de seu uso em estudos científicos. Nos testes de campo o saldo de radiação foi utilizado prioritariamente para o fluxo de calor latente, 56,7% e 43,8%, seguido pelo fluxo de calor sensível, 39,6% e 25,6%, e no solo, 3,6% e 30,5% na área de cana-de-açúcar e urbana, respectivamente.

Palavras chave: razão de Bowen, fluxímetro, piranômetro, saldo radiômetro.

ABSTRACT

SILVA FILHO, A. Estimated energy balance from prototype measures micrometeorological station. Cuiabá, 2015, 63p. Dissertation (Master of Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The conversion of large areas of Cerrado for agronomic crops and in urban areas modifies the microclimate, can be measured by the energy balance. However, the micrometeorological equipment have a high cost. Thus, this research aims to assess the development of a micrometeorological station capable of measuring the energy balance by Bowen ratio method in an area of sugar cane and in an urban area in the municipality of Barra do Bugres, Mato Grosso. In this work were developed balance radiometers, pyranometers, heat meter in the soil and termohigrômetros. These sensors we reset for calibration in conditions similar to commercial sensors, and then installed on a mast located in an area of sugar cane and urban. The energy balance was estimated by the Bowen ratio method. The pyranometer of correlations, balance radiometer, air temperature, and relative humidity, were greater than $R^2=0.98$ and heat meter in the soil $R^2= 0.90$. The net radiation was used primarily for the latent heat flux, 56.7% and 43.8%, followed by the sensible heat flux, 39.6% and 25.6%, and soil, 3.6% and 30.5% in the area of sugar cane and urban, respectively.

Keywords : Bowen ratio, fluxímetro, pyranometers, balance radiometer.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

O Cerrado mato-grossense tem se destacado nos últimos anos pela alta capacidade de produção agrícola, em soja, milho, cana de açúcar, e carne bovina. Entretanto estas atividades exigem a supressão do Cerrado alterando albedo que é dependente do tipo de vegetação, coloração e rugosidade da superfície. Em consequência da alteração de um desses fatores, ocorre a alteração do saldo de radiação ocasionando variações na temperatura da superfície, alterando o balanço de energia devido às mudanças nos fluxos de calor latente e sensível, que determina o tempo e o clima de uma região.

O método da razão de Bowen pode estimar a partição da energia disponível em fluxos de calor latente e sensível por meio de medidas realizadas diretamente no campo, como o saldo de radiação, fluxo de calor no solo e dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água. Apesar de incluir em seus pressupostos o fechamento do balanço de energia, o método da razão de Bowen tem sido utilizado como método padrão em cultivos anuais devido à facilidade de instalação do experimento.

Apesar do custo de instalação do método da razão de Bowen ser menor que do método da correlação de vórtices turbulentos, por exemplo, ele apresenta elevado custo para identificar efeitos das atividades antropogênicas em nível regional a partir de estimativas do balanço de energia com uma rede de medidas micrometeorológicas.

1.2. JUSTIFICATIVA

Atualmente, as estações micrometeorológicas são fabricadas no exterior, o que implica na necessidade de importação. O custo de uma torre micrometeorológica comercial contendo um (1) saldo radiômetro, um (1) fluxímetro de calor de solo, um (1) registrador de dados, uma (1) placa solar, e dois (2) termohigrômetro é de aproximadamente R\$ 19.700,00, contabilizando todo o custo de aquisição e importação. Dessa forma, a viabilização de uma estação, com sensores comerciais adquiridos no mercado nacional tornaria possível a formação de rede de estações micrometeorológicas a custo mais acessível.

O laboratório de instrumentação do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT tem trabalhado no desenvolvimento de sensores micrometeorológicos, como saldo radiômetros, piranômetros e fluxímetros de calor do solo elevada sensibilidade e confiabilidade das medidas. No entanto, esses sensores têm sido instalados em ambientes controlados, sem terem sido instalados no campo, onde são expostos por longos períodos de tempo em ambiente considerado agressivo.

O desenvolvimento e teste a campo de estação micrometeorológica pode consolidar a tecnologia de instrumentação e minimizar a dependência de importação de equipamentos de alto custo.

Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi construir e testar o funcionamento de duas estações micrometeorológicas para estimar do balanço de energia pelo método de razão de Bowen em condições de campo.

Para tanto, os objetivos específicos foram: (I) levantamento do custo de desenvolvimento de uma estação micrometeorológica; (II) construção e calibração da estação micrometeorológica; (III) realização de testes a campo das estações desenvolvidas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BALANÇO DE ENERGIA

O sistema solo-planta-atmosfera está dinamicamente acoplado em um processo físico construído no transporte de energia térmica e massa de água de uma superfície vegetada. Este fenômeno explica, em alguma extensão, a importância do conhecimento acerca da microclimatologia de sistemas de cultivo e florestas (Sá et al., 1988).

A fundamentação do conceito de balanço de energia está na afirmação de que a energia captada ou utilizada em um sistema no caso a comunidade vegetal, é a diferença entre a energia que entra e a energia que sai. Do total da energia solar que chega a superfície parte é utilizada para o aquecimento do ambiente na forma de calor sensível, parte para a transpiração vegetal e evaporação da água do solo na forma de calor latente, parte para o aquecimento do solo gerando um fluxo de calor no solo e uma outra parcela para a fotossíntese.

Observando as leis de conservação da energia radiante, pode-se expressar as trocas de energia entre os fluxos de energia por meio da equação do balanço de energia (Equação1).

$$Rn = H + LE + G + P \quad (1)$$

em que Rn ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é o saldo de radiação, H ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a densidade do fluxo de calor sensível, LE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a densidade de fluxo de calor latente, G ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a densidade de fluxo de calor no solo e P ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a energia utilizada para a realização da fotossíntese.

2.2. SALDO DE RADIAÇÃO

A energia solar é a principal fonte de energia, responsável pelos processos físicos da transpiração vegetal e evaporação da água do solo, o conjunto destes dois processos chamamos de evapotranspiração, sendo a radiação solar a principal energia envolvida no processo. O saldo de radiação ou radiação líquida é a soma algébrica de todos os fluxos de entrada e saída de radiação de ondas curtas e longas sobre uma superfície vegetada. Durante o período diurno onde o fluxo de energia direciona-se para a superfície o valor tende a ser positivo, e negativo durante a noite devido o fluxo estar no sentido oposto. O total diário da energia radiante quase sempre é positivo, exceto em condições extremas, em altas latitudes (Tanner e Lemon, 1962; Allen et al., 2006).

A determinação da energia disponível para os processos de transferência de calor sensível e latente entre superfície e atmosfera é importante a estimativa do R_n real, sobre superfícies naturais, podendo ser solo nu, gramado, culturas anuais ou perenes. Portanto, para obterem-se estimativas corretas de evapotranspiração, é importante obter o R_n medido ou estimado de forma correta e precisa (Oliveira e Leitão, 2000). O saldo radiômetro, sensor para medir R_n , é talvez o mais delicado de todos os sensores utilizados em estações micrometeorológicas. Apesar de serem calibrados anualmente e sofrerem manutenções periódicas, é comum a ocorrência de diferenças acima de 10% entre medidas com instrumento padrão e utilizados (LLSAT e SNYDER, 1998) apud (Neves,2013), devido a natural deterioração por fatores ambientais. (Dias, 2007)

2.3. FLUXO DE CALOR NO SOLO

As transferências de massa e calor nas camadas superficiais do solo condicionam direta e indiretamente na produção agrícola, por influenciar na germinação de sementes, manutenção da atividade microbiana no solo e na densidade de fluxo de calor no solo (G) constitui um termo do balanço de energia que possibilita a avaliação da evaporação e da temperatura do solo (Antonino et al., 1997).

Em estudos de balanço de energia, em ambientes florestais a variação do G , normalmente é desconsiderada devido aos baixos valores observados durante o dia, porém em pastagens devido a maior amplitude diária esse componente não deve ser descartado, pois tem papel importante no fechamento do balanço de energia (Priante Filho et al., 2004). A diferença na amplitude é devido ao G da pastagem ser governado pela variação da radiação solar incidente e pela temperatura do ar, enquanto que na floresta, o G é primariamente dirigido pela temperatura do ar (Bastable et al., 1993).

2.4. FLUXO DE CALOR LATENTE E SENSÍVEL

A estimativa da densidade de fluxo de calor latente, sensível e de momentum de uma superfície é essencial para estudos de modelagens atmosféricas, isto é, para previsão de tempo, clima, poluição do ar e também em estudos da interação solo-planta-atmosfera (Berkowicz e Prahm, 1982).

Os fluxos turbulentos de calor sensível e latente podem ser obtidos por vários métodos micrometeorológicos, com vantagem de não alterarem o meio. O método de correlação dos vórtices turbulentos (“eddy covariance”) obtém esses fluxos diretamente por meio da correlação das flutuações da temperatura e concentração de vapor d’água no ar pela flutuação da velocidade vertical do vento (Baldocchi et al., 1988; Moncrieff et al, 1996; Priante Filho et al., 2004). Outros métodos são derivados de relações conhecidas entre fluxos e gradientes de entidades medidas, como a temperatura e pressão de vapor d’água do ar e velocidade do vento, obtidas por meio de instrumentos micrometeorológicos (Monteith e Unsworth, 1990), como o método da razão de Bowen (Bowen, 1926), o aerodinâmico (Thornthwaite e Holzman, 1939) e o método das resistências (Berkowicz e Prahm, 1982).

Todos esses métodos baseiam-se em equações de conservação de estado, na qual o tempo de mudança de uma propriedade (temperatura e vapor d’água) é balanceado pela média horizontal e a advecção vertical. Em outras palavras, assume-se que a transferência de calor ocorre na posição vertical, não ocorrendo na posição horizontal, chamada de advecção (Baldocchi et al, 1988).

2.5. MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN

O método da razão de Bowen (β), baseia-se na lei da conservação de energia, que afirma que a energia não pode ser criada ou destruída e sim transformada, indicando que a energia radiante é igual a soma das energias dissipadas nos fluxos de calor latente de evapotranspiração e nas densidades de fluxo de calor sensível do ar e do solo, sendo expressa pela equação de balanço de energia. A determinação da razão entre as densidades de fluxo de calor sensível (H) e latente (LE) emitidos pela superfície de água, durante o processo de evaporação, são calculados a partir do gradiente de temperatura e pressão de vapor d'água do ar em alturas diferentes sobre a vegetação, considerando que os valores das constantes de difusão turbulenta para as densidades de fluxo de calor sensível e latente são próximos para uma condição atmosférica neutra.

Esse método tem vantagem de ser relativamente simples, mas, quando utilizado de forma isolada, pode não ser exato. O método parece adequado quando H e LE apresentam o mesmo sinal, em geral quando a superfície está mais úmida e quente que o ar, ou quando está mais fria e seca que o ar. β apresenta valores próximos a zero quando o solo está úmido. Nesta condição, o saldo de radiação está direcionado à livre evapotranspiração. Quando há restrição hídrica, a razão de Bowen apresenta-se elevada ($\beta > 1$), pois o saldo de radiação está sendo utilizado para o aquecimento do ar (Betts et al. 2004).

Em geral, a energia disponível é destinada prioritariamente à evapotranspiração em ambientes vegetados, dependendo da disponibilidade hídrica do solo. A transferência de calor no solo acompanha a disponibilidade energética na superfície, diminuindo a amplitude com o desenvolvimento da cultura, em função do aumento do sombreamento do solo, evidenciado pelo aumento do índice de área foliar da cultura (Cunha et al., 1996). Em vinhedo de 'Niágara Rosada' conduzida em espaldeira, a maior parte do saldo de radiação foi utilizada na LE (59%), com variação de 40% a 86%, dependendo da disponibilidade hídrica do solo, seguida pela H (38%), com variação de 21% a 56%, e do G (3%), com variação de 1% a 9% (Pezzopane e Pedro Júnior, 2003).

Por não necessitar modificar o ambiente para estimar a perda de água para a

atmosfera, o método da razão de Bowen apresenta resultados satisfatórios em várias regiões e condições meteorológicas (Zhang et al, 2002). Além disso, este método tem se mostrado superior a alguns métodos de estimativa da evapotranspiração, sendo em grande parte, utilizado como método padrão (Lima et al.,2005).

O critério para aceitar e/ou rejeitar os dados obtidos pelo método da razão de Bowen baseiam-se naqueles descritos por (Perez et al., 1999). É assumido que os gradientes de temperatura e pressão entre os termohigrômetros são suficientemente distantes, e que a distância da torre até a borda é suficientemente grande para não ter efeito da advecção. O método da razão de Bowen falha quando (1) a resolução do sensor é inadequada para resolver os gradientes temperatura e pressão de vapor d'água (Unland et al., 1996), (2) condições atmosféricas estáveis causam $\beta \approx -1$, como durante ao amanhecer e ao anoitecer (Ortega et al., 1996) e a evapotranspiração tende ao infinito, e (3) as condições mudam abruptamente levando à erros de medição (Perez et al., 1999). Usando este método de filtragem, valores fisicamente realistas de β podem ser obtidos de forma objetiva e quantitativa que limita o potencial de viés e erro na estimativa dos termos do balanço de energia (Perez et al., 1999).

2.6. SENSOR TERMOELÉTRICO

O sensor termoelétrico está fundamentado no efeito Seebeck, que é a conversão direta da diferença de temperatura em tensão elétrica da junção de dois metais ou semicondutores diferentes quando expostos a uma diferença de temperatura (gradiente térmico), a qual produz uma tensão elétrica proporcional ao fluxo térmico que os atravessa (Fernandes.,2012), sendo representado pela Equação (2).

$$V = \alpha_{ab} * (T_1 - T_2) \quad (2)$$

em que V é a tensão gerada, α_{ab} é o coeficiente Seebeck e $T_1 - T_2$ é a diferença de temperatura entre as junções.

O coeficiente de Seebeck é medido em μVK^{-1} e varia de acordo os materiais usados nas junções (Figura 1) e são explicados pela assimetria da distribuição de elétrons à volta do nível de Fermi (Souza, 2013).

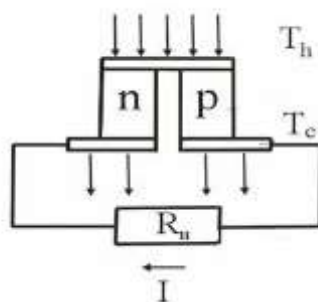


Figura 1. Representação esquemática de um Termopar e o efeito Seebeck.

Uma vez que o efeito Seebeck é termicamente reversível no efeito Peltier, o qual é a produção de um gradiente de temperatura nas junções de dois condutores diferentes quando submetidos a uma diferença de potencial, os dispositivos Peltier podem atuar também como termogeradores (Santos, 2010).

Atualmente os módulos comerciais Peltier (Figura 2) utilizam semicondutores de telureto de bismuto (Bi_2Te_3) e apresentam um coeficiente Seebeck da ordem de $250 \mu\text{VK}^{-1}$ a temperatura ambiente (Moura., 2010).

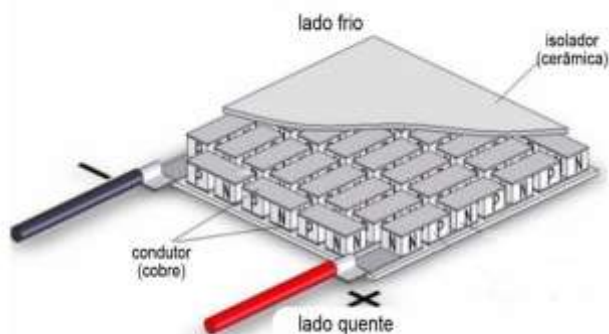


Figura 2. Exemplificação de um módulo Peltier comercial.

Nos piranômetros térmicos, a radiação solar é convertida em energia térmica sendo que o elemento sensível é um conjunto de termopares em série, que converte a diferença de temperatura entre suas faces em uma tensão elétrica proporcional à radiação solar incidente (Loro Neto, 1996).

2.6. SENSOR FOTOVOLTAICO OU QUÂNTICO

Os sensores quânticos são células fotovoltaicas ou fotodiodos que geram um sinal elétrico proporcional à radiação incidente, onde o fóton emitido por uma fonte de radiação é absorvido por um material semiconductor excitando elétrons da banda de menor energia, chamada de banda valência, provocando o salto de elétrons excitados para a banda de maior energia, ou banda de condução, gerando um potencial, potencial quando o material é exposto à radiação (Paes, 2012).

A Figura3 exemplifica o funcionamento de uma célula fotovoltaica.

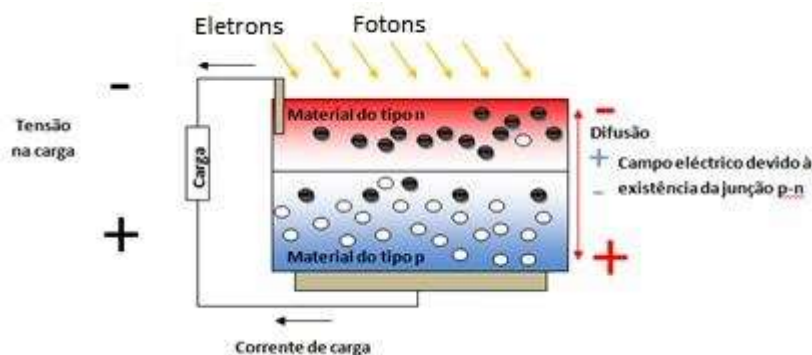


Figura 3. Representação do efeito fotovoltaico.

2.7. SENSOR NTC

Termistores NTC (Negativo Temperatura Coeficiente) são materiais cerâmicos, com misturas de óxidos de metais que apresentam diminuição da resistência elétrica com o aumento da temperatura, são utilizados para medidas precisas de pequenas variações de temperatura (Figura 4) (Silva, 2010).

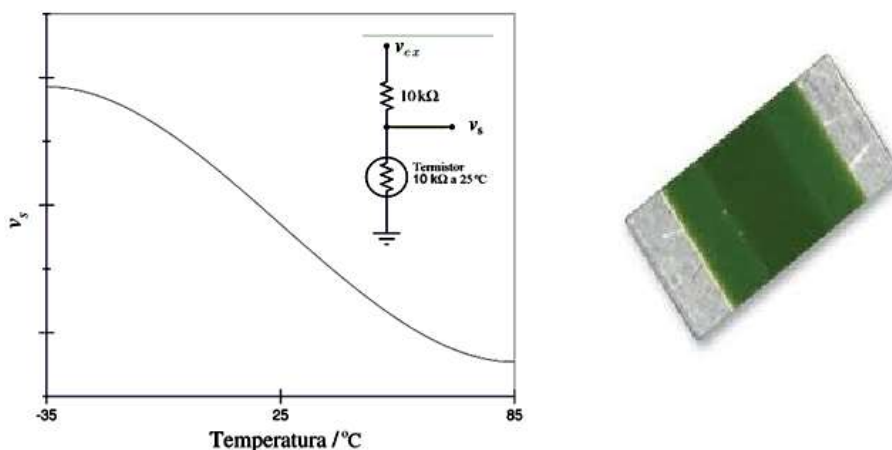


Figura 4. Curva de resposta do NTC e componente comercial.

2.8. SENSOR CAPACITIVO

Sobre um eletrodo é depositado uma camada fina de polímero higroscópico que tem sua rigidez dielétrica proporcional ao teor de vapor de água e atua como o dielétrico; em cima do polímero é aplicada uma placa superior porosa que permite que o vapor de água passe através dele para o polímero, e atua como o segundo eletrodo formando o capacitor (Viliotti et al., 2014).

A medida da umidade relativa via alteração da capacitância é efetuada pela queda tensão ocorrida no capacitor variável devido a alteração da impedância em um circuito em série de capacitores (Figura 5) submetidos um oscilador de frequência estável, a queda tensão é então convertida em umidade relativa do ar.

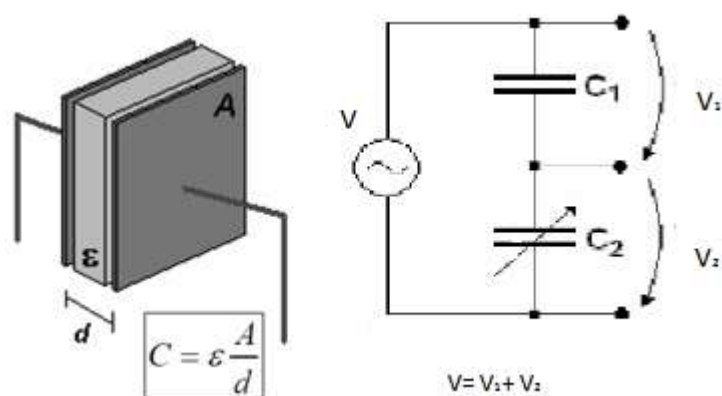


Figura 5. Sensor capacitivo e sistema de medição

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCAL DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido em dois sítios experimentais (Figura 6). O sítio 1 foi localizado em uma área de plantio de cana-de-açúcar ($15^{\circ} 08' 16''$ de Latitude Sul, $56^{\circ} 59' 54''$ de Longitude Oeste e 205 m de altitude), onde foi instalado um mastro micrometeorológico de 6 m de altura (Figura 7) na Fazenda Arco-Íris, município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

O Sítio 2 foi localizado em uma área urbana ($15^{\circ} 03' 99''$ de Latitude Sul, $57^{\circ} 10' 50''$ de Longitude Oeste e 170 m de altitude), onde também foi instalado um mastro micrometeorológico de 9 m de altura (Figura 8), no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.



Figura 6.Localização dos sítios experimentais no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.



Figura 7. Foto da área de cana-de-açúcar onde o mastro micrometeorológico foi instalado no Sítio 1 na fazenda Arco-íris, Barra do Bugres, Mato Grosso.



Figura 8. Foto da área urbana onde o mastro micrometeorológico foi instalado no Sítio 2, Barra do Bugres, Mato Grosso.

3.2. ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS DESENVOLVIDAS

Os sensores micrometeorológicos desenvolvidos utilizados nos dois sítios experimentais foram idênticos. Eles foram desenvolvidos no laboratório de instrumentação do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental e calibrados em função das medidas produzidas por sensores comerciais, os quais foram instalados em condições micrometeorológicas idênticas. Os detalhes de construção de cada um dos sensores e do *datalogger* foram descritos nos itens subsequentes.

O saldo de radiação e a radiação solar incidente e refletida foram medidos a 3 m de altura do solo sobre o dossel da cana-de-açúcar e a 6 m de altura na área urbana. O fluxo de calor no solo foi medido a 2 cm de profundidade nos dois sítios experimentais. O perfil de temperatura e umidade relativa do ar foi medido a 1,5, 3, e 6 m de altura na área de cana-de-açúcar e 1,7, 4,5 e 9 m de altura na área urbana.

3.3. CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DESENVOLVIDOS

Para a calibração dos sensores, o mastro micrometeorológico contendo os sensores desenvolvidos foram instalados medindo as mesmas condições dos sensores comerciais instalados em um outro mastro micrometeorológico contendo sensores comerciais. As medidas foram realizadas durante 1 semana para testar a eficiência do painel solar, das baterias, realizar testes de possíveis interferências nas leituras devido temperatura interna no invólucro do *datalogger*, e resistência do circuito a umidade (Figura 9).

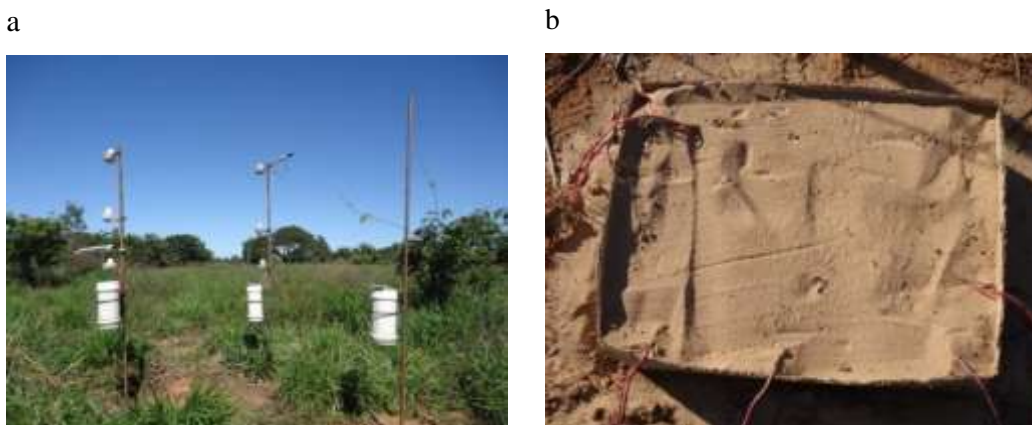


Figura 9. (a) Estações micrometeorológicas desenvolvida nesse trabalho e comercial medindo as mesmas condições microclimáticas e (b) fluxo de calor no solo desenvolvido nesse trabalho e comercial colocados na mesma profundidade em uma caixa de areia.

As calibrações foram realizadas por regressões lineares simples adotando como referência aos sensores comerciais. Para tanto, foram utilizados um piranômetro (LI-200, Campbell Sci, Inc., USA), um sensor de fluxo de calor no solo (HFP01-15, ThermalSensors, Hukseflux) e um saldo radiômetro (NR-LITE25, Kipp&ZonenNetherlands). Esses sensores foram conectados a um *datalogger* (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah) para registro e armazenamento dos dados.

Os termohigrômetros dos mastros micrometeorológicos com sensores desenvolvidos nesse trabalho foram calibrados entre si, usando sempre o termohigrômetro do meio como referência. Essa calibração proporcionou uma relação entre a temperatura, umidade relativa e pressão de vapor d'água do ar medidos em cada um dos termohigrômetros. Essa relação é necessária para retirar o efeito do termohigrômetro quando se mede os gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água do ar necessários para calcular os fluxos de energia pelo método da razão de Bowen.

3.4. ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA

O balanço de energia da área da cana-de-açúcar e da área urbana foi estimado pelo método da razão de Bowen. A equação geral do balanço de energia foi utilizada na forma simplificada (Oliveira e Leitão., 2000) (Equação 3).

$$Rn = LE + H + G \quad (3)$$

em que Rn é o saldo de radiação sobre a superfície vegetada ($W m^{-2}$), G é a densidade de fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$), LE é a densidade de fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) e H é a densidade de fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

Por definição, a razão entre H e LE é denominada razão de Bowen (β) (Equação 4).

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (4)$$

Combinando β com a equação geral do balanço de energia, tem-se as Equações (5) e (6).

$$LE = \frac{1}{1 + \beta} (Rn - G) \quad (5)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (Rn - G) \quad (6)$$

Durante um período médio, as relações empíricas entre os fluxos e gradientes verticais podem ser formuladas como as Equações (7) e (8).

$$LE = -\frac{\rho_a c_p}{\gamma} k_v \frac{\partial e}{\partial z} \quad (7)$$

$$H = -\rho_a c_p k_h \frac{\partial T}{\partial z} \quad (8)$$

em que ρ_a é a densidade média do ar, c_p é o calor específico do ar seco à pressão constante e k_h e k_v são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água, respectivamente. Assumindo $k_h = k_v$ (Verma et al., 1978) e tomando medidas entre dois níveis da camada superficial ajustada, β é obtido pela Equação (9).

$$\beta = \gamma \frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (9)$$

em que ΔT é diferença de temperatura do ar entre dois níveis (°C), Δe é diferença de pressão de vapor d'água do ar entre dois níveis (kPa) e γ é a constante psicrométrica.

A pressão de vapor d'água do ar atual (e) em cada altura foi calculada conforme pela Equação (10).

$$e = \frac{e_s UR}{100} \quad (10)$$

A pressão de vapor d'água do ar saturado (e_s) em (kPa) em cada altura foi obtida como uma função da temperatura do ar (T) em cada altura, conforme a Equação (11).

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T} \right)} \quad (11)$$

Por convenção, o sinal de Rn foi positivo no sentido da superfície e os fluxos de energia LE , H e G foram positivos no sentido oposto ao da superfície. O fluxo de H é positivo quando o gradiente de temperatura ($\partial T / \Delta z$) > 0 e LE é positivo quando o gradiente de pressão de vapor ($\partial e / \Delta z$) > 0 (Figura 17).

3.5. CRITÉRIO PARA REJEIÇÃO DOS DADOS INADEQUADOS ESTIMADOS PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN

Para rejeitar valores inconsistentes, incluindo aqueles fora dos limites da resolução instrumental, adotou-se análise física do método, conforme (Perez et al. 1999). Segundo esses autores, a estimativa de LE e H fornecida pelo método da razão de Bowen deve ser consistente com a relação fluxo-gradiente, mas, em algumas vezes, as medidas dão sinais incorretos para esses fluxos. Dessa forma, as Equações (5) e (9) podem ser arranjadas nas Equações (12) e (13).

$$Rn = \left(1 + \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \right) LE + G \quad (12)$$

$$\frac{\Delta e}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{H} = \frac{\Delta e + \lambda \Delta T}{Rn - G} > 0 \quad (13)$$

A expressão representada pela Equação (13) deve sempre ser maior que 0, de acordo com a convenção de sinais (Figura 17). Os dados fornecidos pelo método da razão de Bowen serão corretos quando atenderem à desigualdade abaixo (Tabela 1). Consequentemente, quando $Rn - G > 0$, $\Delta T > -\Delta e / \gamma$. Isso é, $\beta > -1$ se $\Delta e > 0$, mas $\beta < -1$ se $\Delta e < 0$. Quando $Rn - G < 0$, $\Delta T < -\Delta e / \gamma$. Isso é, $\beta < -1$ se $\Delta e > 0$, mas $\beta > -1$ se $\Delta e < 0$. Quando $Rn - G > 0$, se $\beta > -1$, pelo princípio da conservação de energia, é deduzido que LE deve ser sempre positivo, visto que H pode ser positivo ou negativo, dependendo do sinal de β . Se $\beta < -1$, são possíveis apenas os casos $LE > 0$ e $H > 0$. Quando $Rn - G < 0$, se $\beta > -1$, são apenas possíveis os casos $LE > 0$ e $H < 0$. Se $\beta < -1$, então LE será sempre negativo, visto que H pode ser positivo ou negativo, dependendo do sinal de β . Se essas condições não forem satisfeitas (Tabela 1), o método da razão de Bowen fornecerá um sentido incorreto de fluxo e os dados serão descartados. Isso apenas ocorre no início da manhã e ao entardecer, quando o fluxo de calor muda de sinal, em que Δe apresenta valores baixos (próximo do limite de resolução $\delta\Delta e$), e quando os valores de $Rn - G$ são baixos. Para a análise dos dados e a exclusão de valores de β inconsistentes, utilizaram-se as condições propostas por (Perez et al., 1999) resumidas na Tabela 2.

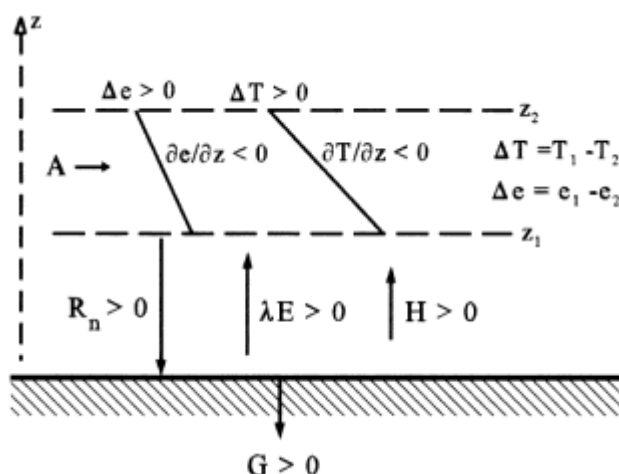


Figura 10. Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície vegetal, mostrando a convenção de sinais. A – fluxo de energia advectiva para o volume de controle acima da superfície; R_n – saldo de radiação; λE e H – fluxos de calor latente e sensível; G – fluxo de calor no solo; Δe e ΔT - diferença de pressão de vapor e temperatura entre os níveis inferior (z_1) e superior (z_2), e $\partial e / \partial z$ e $\partial T / \partial z$ – gradientes de pressão de vapor e temperatura.

Tabela 1. Limites de aceitabilidade dos valores obtidos pelo método da razão de Bowen sob condições não advectivas, em que R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo, Δe é a diferença entre os níveis superior e inferior, LE é o fluxo de calor latente e H é o fluxo de calor sensível.

Energia disponível	Gradiente de Pressão de Vapor	Razão de Bowen	Fluxos de Calor
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Tabela 2. Resumo das classes de erros gerados pelo método da razão de Bowen (Perez et al., 1999), em que $Rn - G$ é a energia disponível, Δe é a diferença entre os níveis superior e inferior, β é a razão de Bowen, T é a temperatura do ar, e é a pressão de vapor, ε é o intervalo de erro que define o intervalo de exclusão dos valores de razão de Bowen, LE e H são os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente.

Classe de Erro	Condição
<i>A</i>	$Rn - G > 0, \Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \varepsilon $
<i>B</i>	$Rn - G > 0, \Delta e < 0$ e $\beta > -1 - \varepsilon $
<i>C</i>	$Rn - G < 0, \Delta e > 0$ e $\beta > -1 - \varepsilon $
<i>D</i>	$Rn - G < 0, \Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \varepsilon $
<i>E</i>	Mudanças rápidas em T e e

Para preenchimento dos valores descartados ao adotar a metodologia descrita por (Pérez et al, 1999), foram utilizadas regressões lineares simples entre os valores das densidades dos fluxos não descartados e $Rn - G$, obtidos num intervalo de três dias antes e três dias após serem observados os valores descartados. Para selecionar a regressão utilizada para preenchimento dos dados, tomou-se como base a função da regressão que apresentou melhor ajuste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DESENVOLVIMENTO DAS ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS

4.2.1. Piranômetro Desenvolvido

O piranômetro desenvolvido seguiu as especificações propostas por (Neves, 2013). O corpo do piranômetro desenvolvido consistiu de um cilindro sólido de alumínio usinado, com três níveis de rebaixo consecutivos (Figura 11a). O primeiro rebaixo foi usado para acomodação de uma placa de circuito impresso em forma de disco como suporte do sensor. O segundo rebaixo foi usado para acomodação do sensor (BPW34, Vishay Semiconductors) (Figura 11b). O terceiro rebaixo (Figura 11c) foi utilizado para encaixe do colimador de acrílico (Figura 11d). A parte traseira da placa com o sensor também foi usada como base para a resistência de shunt (Figura 11e). O cabo de sinal do sensor passou por um furo na lateral do corpo do piranômetro (Figura 11f). A base do piranômetro (Figura 11g) também foi feita em alumínio torneado para encaixe na parte inferior do corpo do piranômetro. Após a montagem o sensor foi selado com borracha de silicone para evitar umidade (Figura 11e).

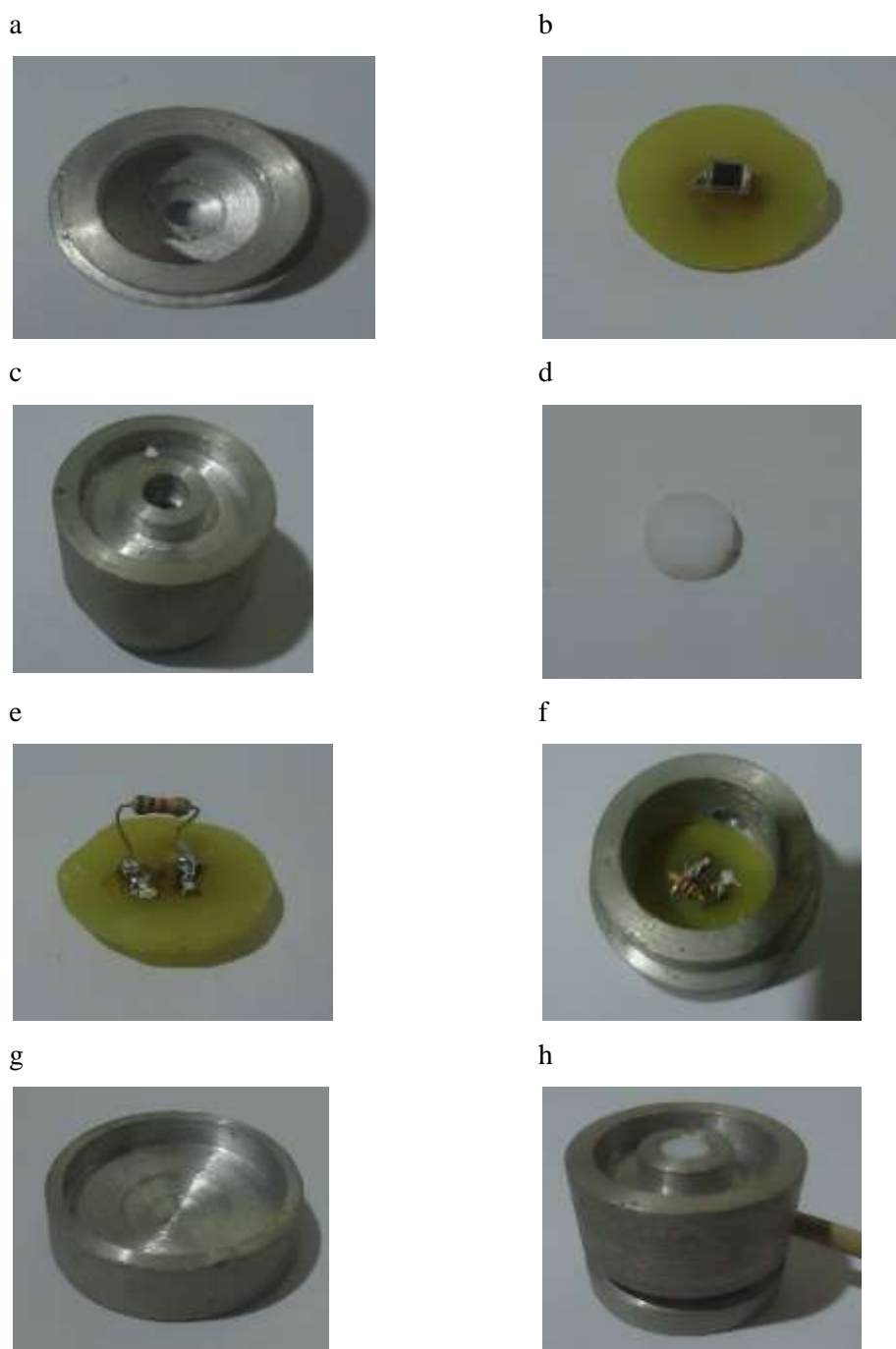


Figura 11. Etapas de construção do piranômetro usado nas estações micrometeorológicas.

4.2.2. Saldo Radiômetro e Fluxímetro de Calor no Solo Desenvolvidos

O saldo radiômetro e o fluxímetro de calor no solo foram construídos

utilizando duas (2) pastilhas Peltier (TEC-112706, Acel) sobrepostas (Figura 12a). As duas placas de Peltier foram unidas com pasta térmica e foram ligadas eletricamente em série, proporcionando uma maior diferença de tensão pela mesma diferença de temperatura entre as faces superior e inferior.

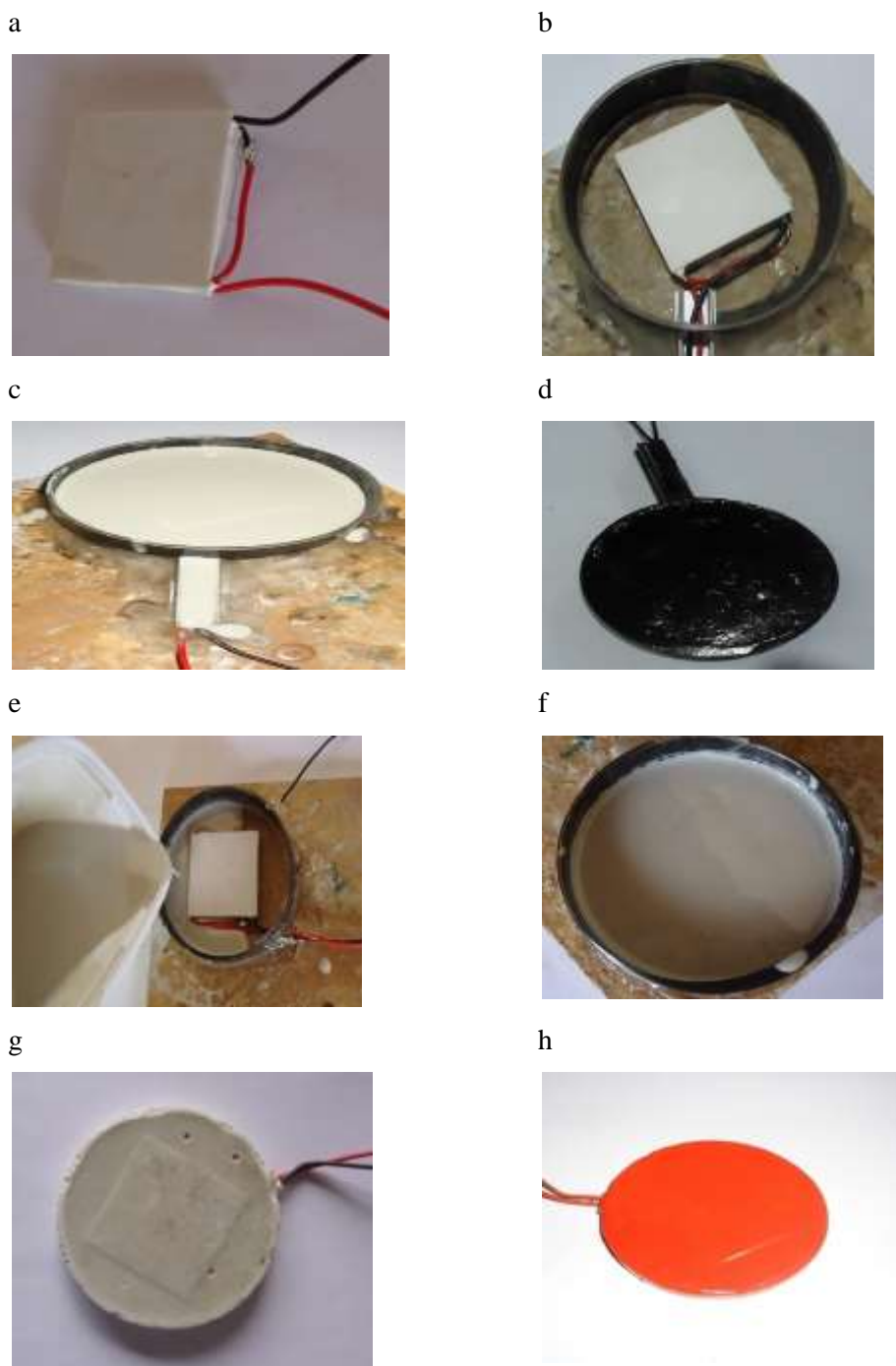


Figura 12. Etapas de construção do saldo radiômetro e do fluxímetro de calor no solo usados nas estações micrometeorológicas.

O conjunto inserido em uma fôrma cilíndrica de acrílico (Figura 12b) e envolvida em resina de poliéster (Figura 12c), mantendo uma camada de 0.5 mm de resina na face superior e inferior, com uma haste de fixação na lateral para acomodar os cabos. Após secar a resina de poliéster, o conjunto foi pintado de cor preta (Figura 12d).

Seguindo o mesmo princípio físico do saldo radiômetro, o fluxímetro de calor do solo foi construído de forma idêntica ao saldo radiômetro sem a haste de fixação. Como o fluxímetro de calor no solo fica enterrado no solo e o fluxo de calor medido é somente por condução, somente uma das faces foi pintada de alaranjado, para facilitar a identificação do lado superior.

A Figura 6e mostra o fluxímetro de calor no solo pronto para receber resina de poliéster. Na sequência o sensor já em processo de cura e desmoldado antes do acabamento (Figuras 12f e 12g) e após a pintura (Figura 12h).

4.2.3. Termohigrômetro e Abrigo Termohigrométrico Desenvolvido

O termohigrômetro é um instrumento que permite obter diretamente a temperatura e a umidade relativa do ar, através de dois sensores conjugados. O termohigrômetro usado no experimento foi o DHT22, por englobar características desejáveis como precisão, baixo consumo, comunicação digital, resistência a intempéries e calibração de fábrica (Figura 13).

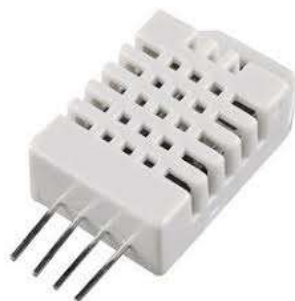


Figura 13. Termohigrômetro DHT22 usado nas estações micrometeorológicas.

Este sensor possui um sensor de umidade capacitivo e um sensor de temperatura NTC, conectado a um microcontrolador de 8 bits responsável pela

leitura dos sensores e conversão dos dados analógicos em digitais, com capacidade de comunicação de até 20 metros.

O conjunto sensor foi protegido por um abrigo meteorológico de plástico na cor branca, evitando a exposição direta dos sensores aos raios solares e à chuva, e garantindo a livre circulação do ar, permitindo um equilíbrio com a atmosfera a sua volta.

Cada abrigo foi montado usando 3 suportes de PVC (Figura 14a) usados para soquete de luminária doméstica superpostos, e o topo coberto com um nipel de PVC (Figura 14b); o conjunto foi fixado por 2 parafusos nas laterais com espaçadores de 10 mm entre cada suporte para a livre passagem do ar (Figura 14c).

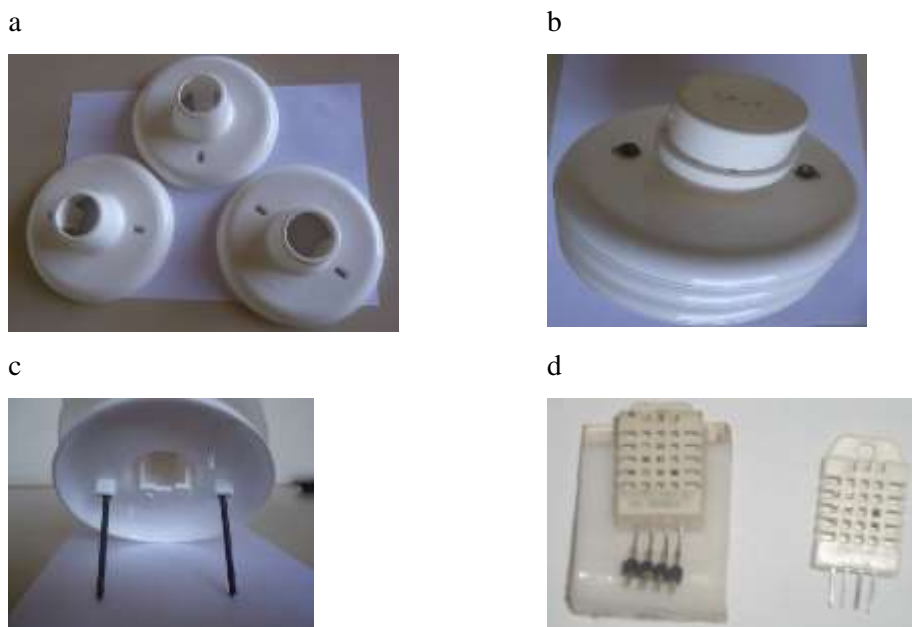


Figura 14. Etapas de construção do abrigo termométrico e fixação do termohigrômetro usado nas estações micrometeorológicas.

4.2.4. *Datalogger* Desenvolvido para Leitura e Armazenamento dos Dados

Um *datalogger* ou gravador de dados é um dispositivo eletrônico que registra os dados ao longo do tempo medidos por instrumentos e sensores internos ou externos. São compostos por um processador digital, com memória interna para armazenamento de dados e sensores. Um dos principais benefícios do uso do *datalogger* é a capacidade de coletar automaticamente os dados durante o período de

monitoramento, permitindo um retrato abrangente e rigoroso das condições ambientais que estão sendo monitoradas.

Com o intuito do desenvolvimento de um *datalogger* de uso geral na coleta de dados ambientais foram estabelecidas como especificações: (I) coleta de dados via *pen drive*, facilitando a coleta dos dados no campo sem a necessidade de computadores ou outro recurso computacional, aliada a alta capacidade de armazenamento de dados; (II) dados gravados no formato texto (txt) por ser formato de dados nativo de softwares de planilhas eletrônicas e banco de dados; (III) possibilidade de reprogramação em campo; (IV) baixo consumo de energia; (V) grande autonomia; (VI) dezesseis entradas analógicas e três entradas digitais para termohigrômetros, e (VII) sinalizador visual do status de funcionamento do equipamento.

O micro controlador escolhido (18f452, Microchip Technology Inc) apresenta 32kb de memória, conversor A/D (analógico/digital) de 10 bits, 33 portas de entrada ou saída disponíveis, baixo consumo de energia, farta literatura e baixo custo (Figura 15).



Figura 15.Microcontrolador 18f452 usado para construção do *datalogger* das estações micrometeorológicas.

A sincronia temporal foi obtida do relógio de tempo real (ds1302, *MaximIntegrated*) por possuir comunicação serial bidirecional compatível com os níveis de tensão do microcontrolador utilizado, baixo consumo de energia e sistema de bateria auxiliar (Figura 16).



Figura 16.Relógio de tempo real ds1302 usado para construção do *datalogger* das estações micrometeorológicas.

A necessidade de entradas analógicas em número superior às disponíveis no microcontrolador exigiu o uso de 2 multiplexadores analógicos (CD4051 Texas Instruments) ampliando a capacidade do microcontrolador para 16 entradas analógicas (Figura 17).



Figura 17. Multiplexador analógico CD4051 usado para construção do *datalogger* das estações micrometeorológicas.

O armazenamento dos dados em *pen drive* foi efetuado com o módulo embarcado (PenBS Tato Equipamentos Eletrônicos Ltda) (Figura 18), por possuir comunicação serial assíncrona compatíveis com microcontroladores e a gravação dos dados diretamente em “*pen drive*” (“flash Disk”) no formato de sistema de arquivos FAT 32, o que possibilita a coleta de dados apenas com uma simples troca de *pen drive* sem a necessidade de um computador junto ao *datalogger*.



Figura 18. Módulo embarcado PenBS usado para construção do *datalogger* das estações micrometeorológicas.

Visando maior flexibilidade do *datalogger*, todo o projeto foi dividido nos módulos: (I) uma placa mãe (Figuras 19a e 19b); (II) multiplexador ADC (Figura 19c); (III) relógio de tempo real (Figura 19d); e (IV) painel de bornes (Figura 19e), o que permite facilidade do projeto lógico, testes em simuladores, desenvolvimento da placa de circuito impresso, montagem das placas, testes e aferição individual dos módulos antes da montagem final do *datalogger* (Figura 19f).

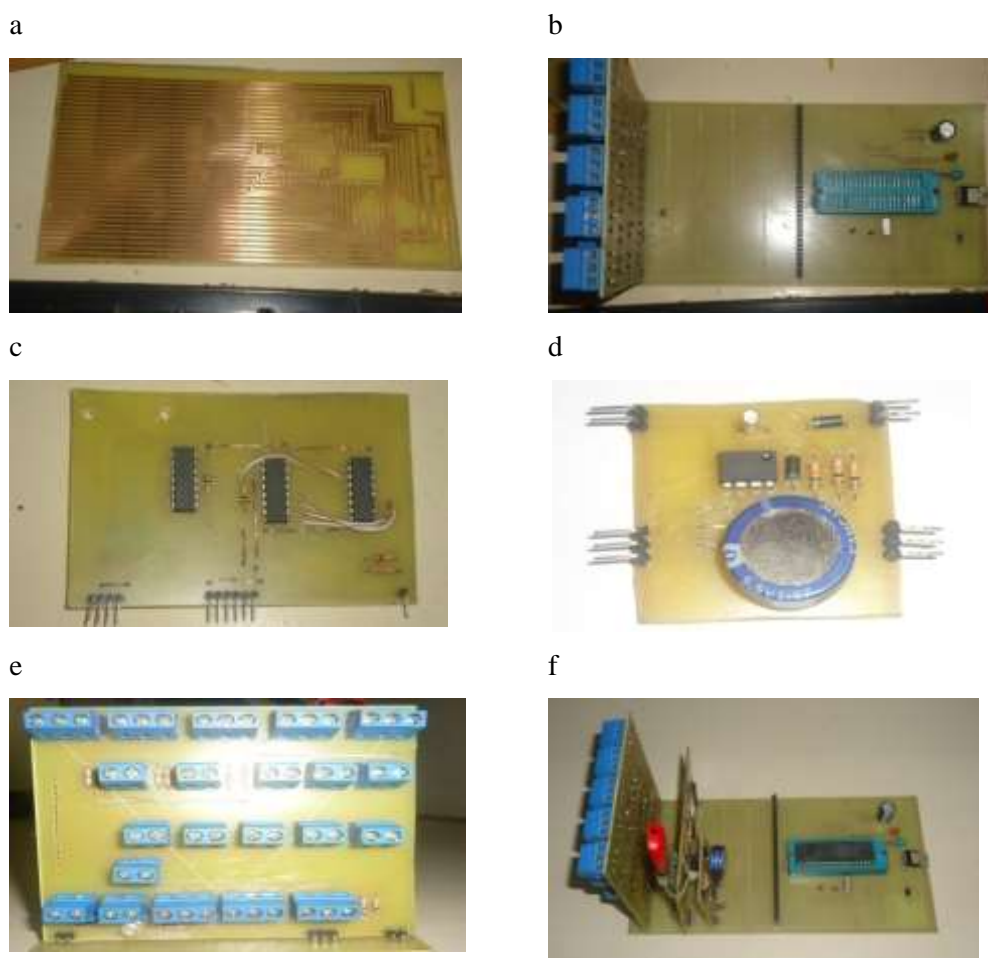


Figura 19.Módulos do *datalogger* das estações micrometeorológicas.

A energia para alimentar todo o sistema foi fornecida por uma bateria de 12V e 7Ah, mantida em flutuação com um painel solar de 5 W.



Figura 20.Painel solar de 5W utilizado para carregar as baterias das estações micrometeorológicas.

O microcontrolador foi programado para uma leitura de todas as entradas a cada 2 segundos e a gravação das médias das 30 leituras a cada minuto para maior

granularidade de dados.

Para a visualização rápida do estado de funcionamento do *datalogger* um led indicativo foi instalado no painel de bornes com indicativos luminosos que indicavam o status de funcionamento de todo o equipamento: pulsos rápidos indicavam que as leituras estavam sincronizando com relógio de tempo real; pulsos intermitentes indicavam que estava em processo de leitura de dados; aceso sem intermitência indicava que estava em processo de gravação dos dados; e apagado indicava defeito ou desligado da alimentação elétrica.

O fluxograma de programação do *datalogger* pode ser observado na Figura 21.

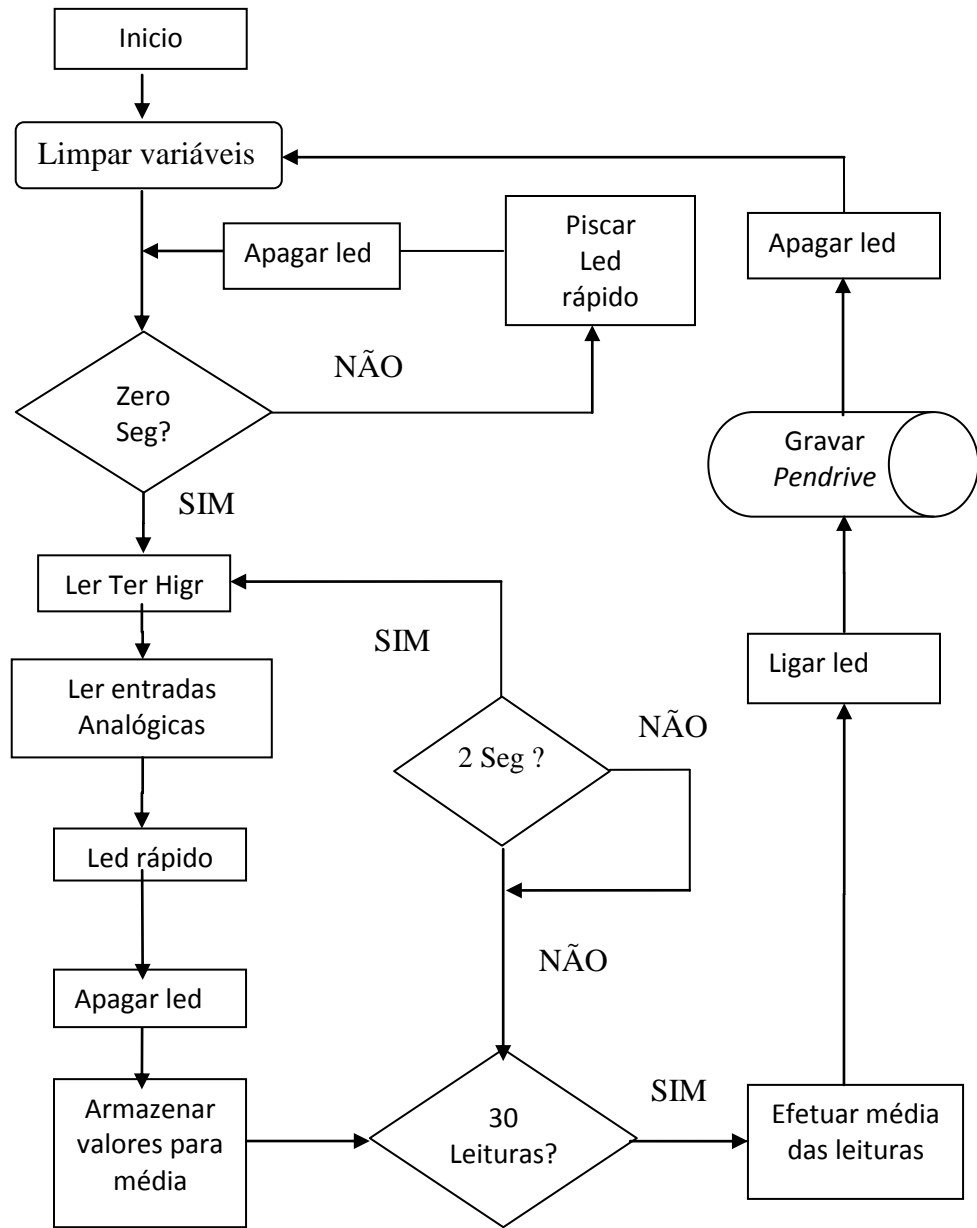


Figura 21. Fluxograma do programa do *datalogger* das estações micrometeorológicas.

4.2. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DESENVOLVIDOS

A figura 22 apresenta a leitura dos piranômetros protótipos e comerciais na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

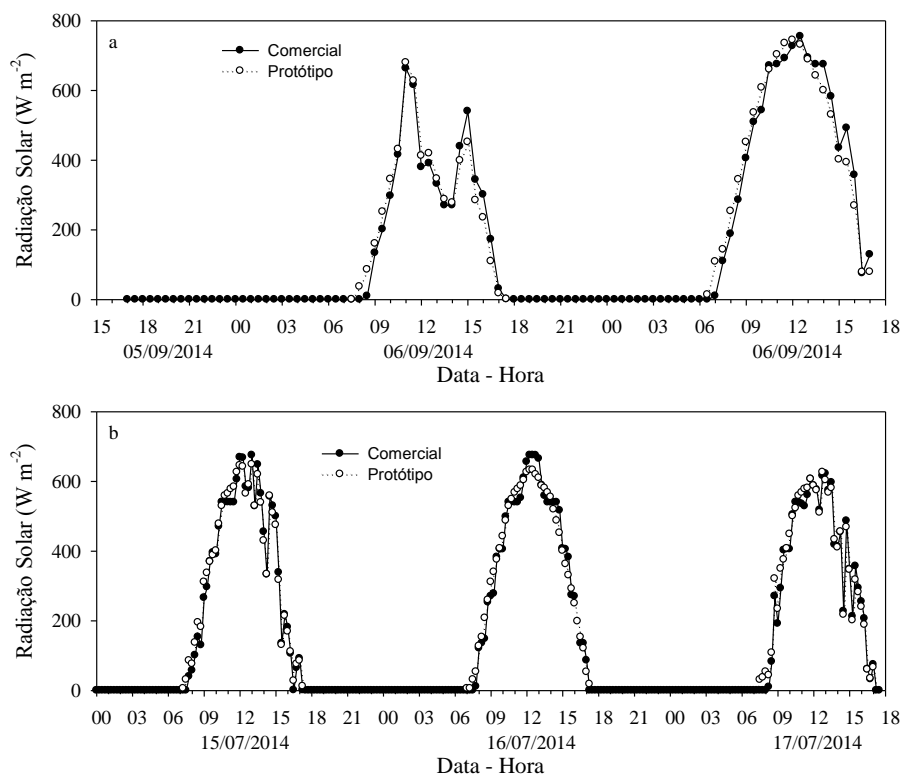


Figura 22. Variação da radiação solar ao longo dos dias de calibração dos piranômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

Verifica-se pela Figura 23 que os sensores de radiação solar incidente apresentaram uma alta correlação com os sensores de referência com coeficiente de dispersão (R^2) acima de 0.98.

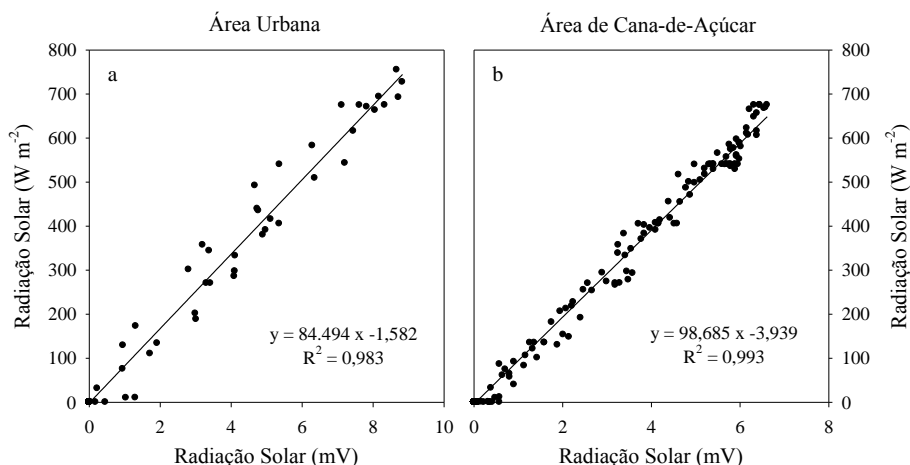


Figura 23. Regressão linear simples entre os dados medidos pelos piranômetros (a e b) desenvolvidos nesse trabalho (abscissas) e comerciais (ordenadas) instalados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

A figura 24 apresenta o saldo de radiação do saldo radiômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b).

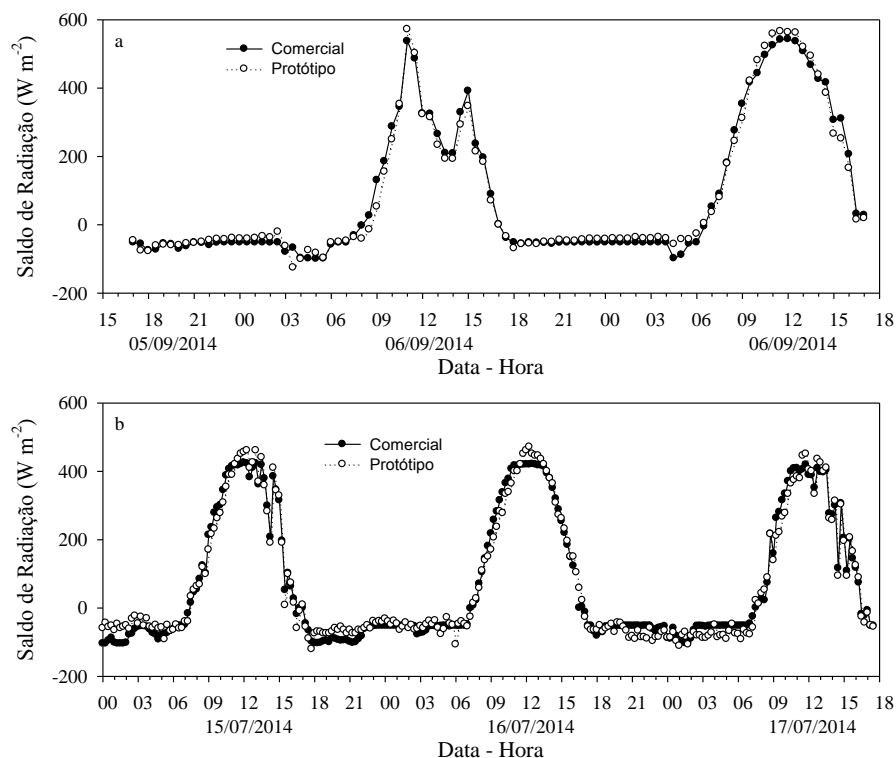


Figura 24. Variação do saldo de radiação ao longo dos dias de calibração do saldo radiômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

Verifica-se pela Figura 25 que os sensores de saldo de radiação apresentaram uma alta correlação com os sensores de referência com coeficiente de dispersão (R^2) acima de 0.98

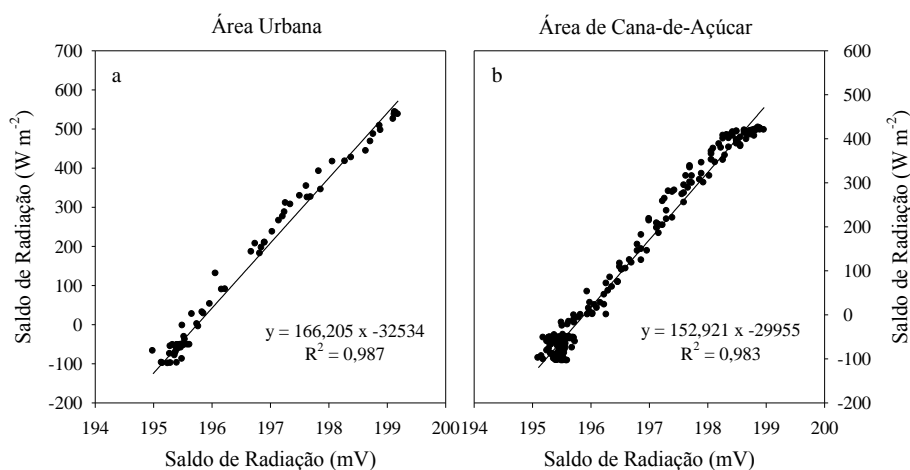


Figura 25.Regressão linear simples entre os dados medidos pelos saldos radiômetros (a e b) desenvolvidos nesse trabalho (abscissas) e comerciais (ordenadas) instalados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

A figura 26 apresenta o fluxímetro de calor do solo protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b).

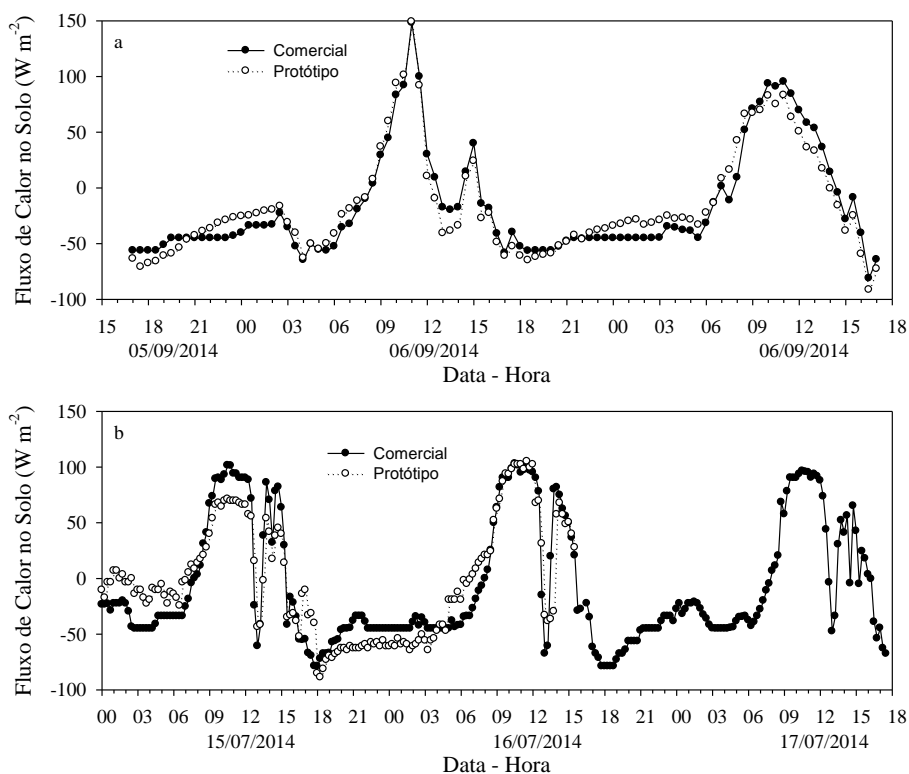


Figura 26. Variação do fluxo de calor no solo ao longo dos dias de calibração dos fluxímetros de calor no solo protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

Embora os sensores de fluxo de calor no solo apresentem correlação R^2 de 0,93 e 0,89, a reta estimada foi significativa figura 27.

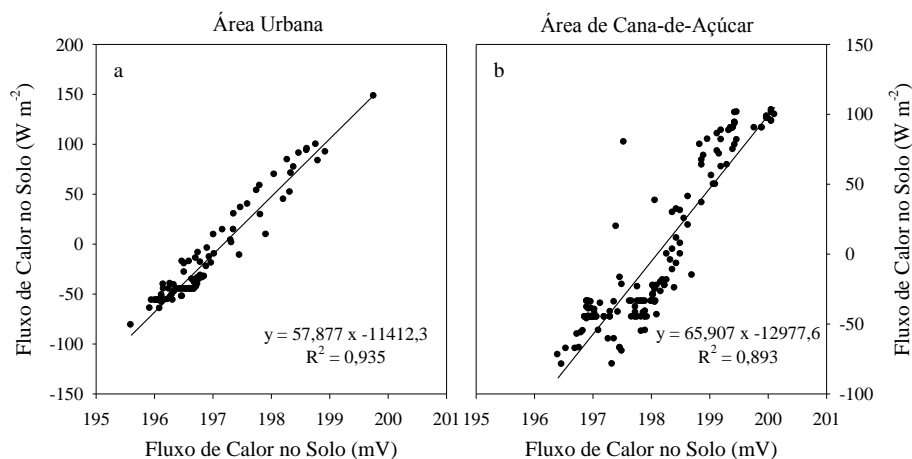


Figura 27. Regressão linear simples entre os dados medidos pelos fluxímetros de calor no solo (a e b) desenvolvidos nesse trabalho (abscissas) e comerciais (ordenadas) instalados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

A figura 28 apresenta a temperatura do ar obtido do termohigrômetro protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b).

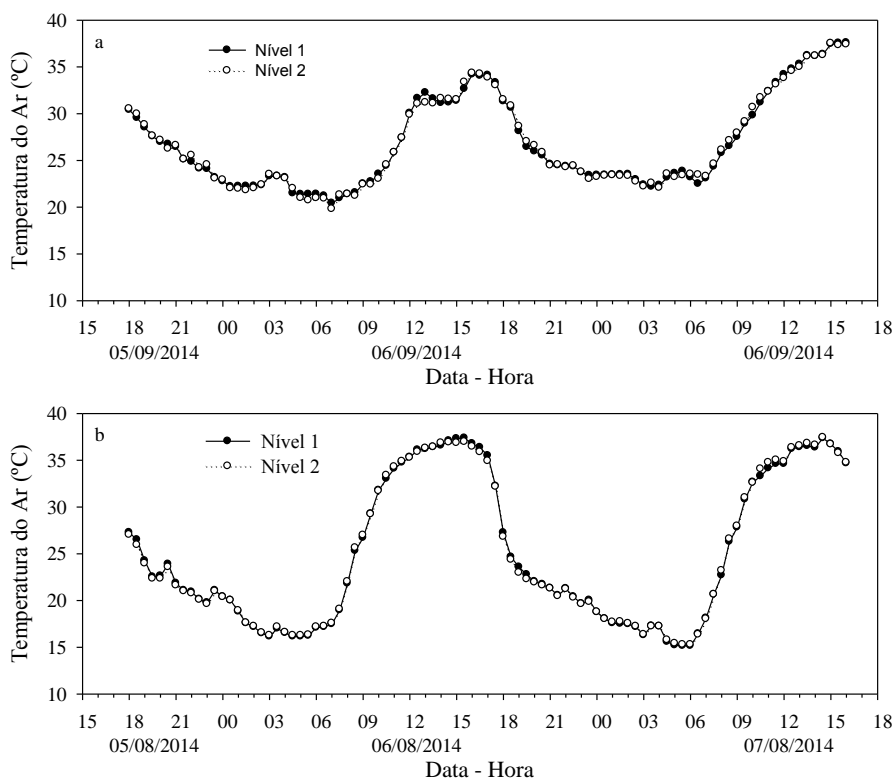


Figura 28. Variação da temperatura do ar ao longo dos dias de calibração dos termohigrômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

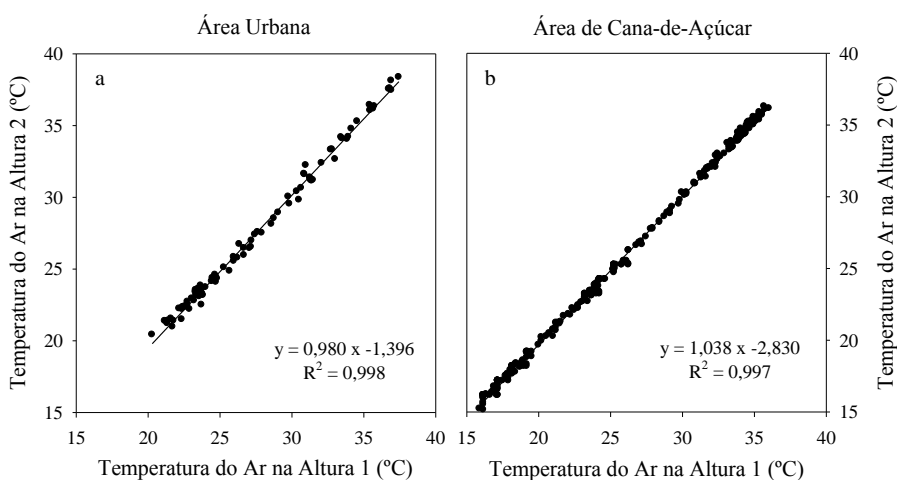


Figura 29. Regressão linear simples entre a temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 medidos pelos termohigrômetros protótipos que foram instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

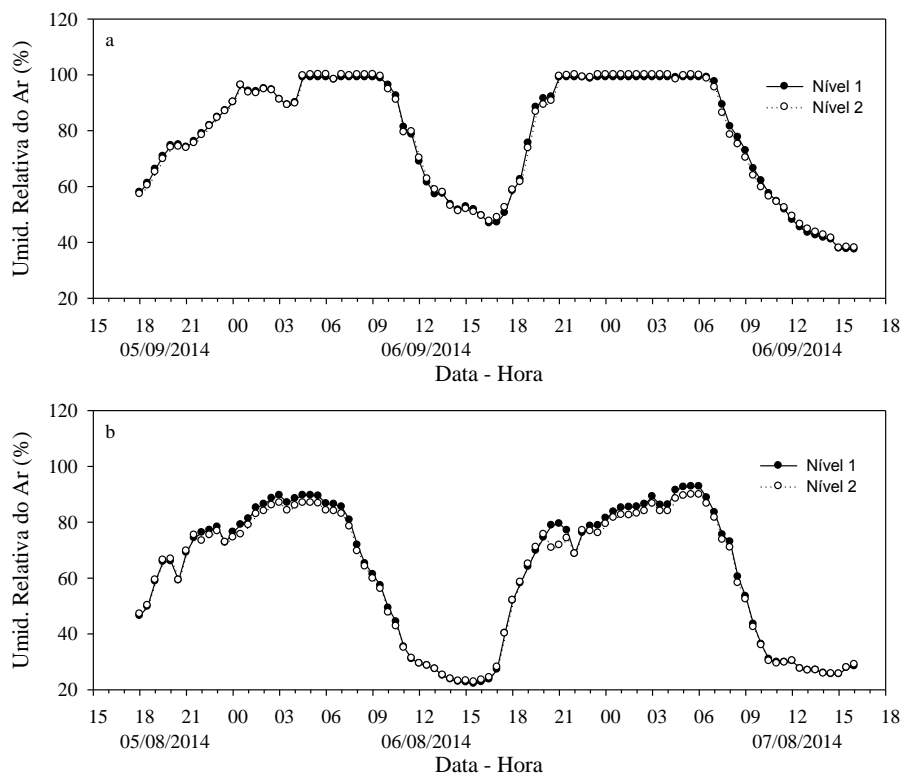


Figura 30. Variação da umidade relativa do ar ao longo dos dias de calibração dos termohigrômetros protótipos instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

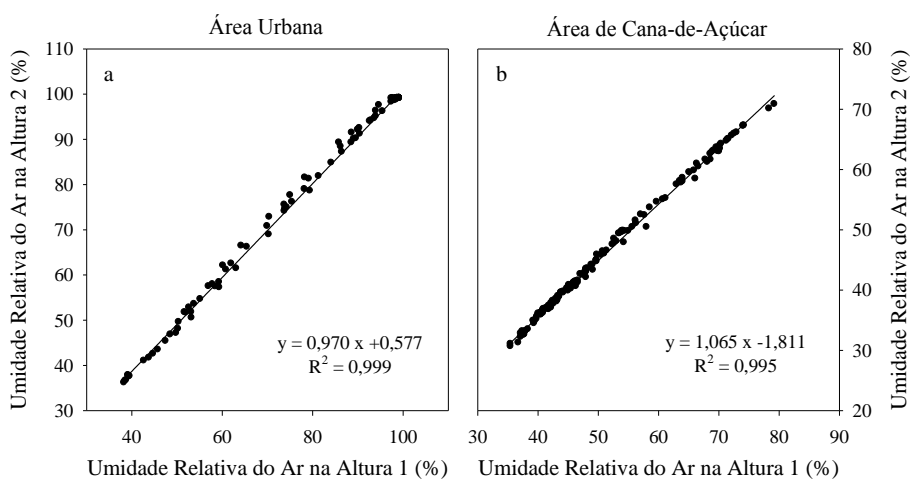


Figura 31. Regressão linear simples entre a umidade relativa do ar entre os níveis 1 e 2 medidos pelos termohigrômetros protótipos que foram instalados na área urbana (a) e de cana-de-açúcar (b) no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

As calibrações dos termohigrômetros desenvolvidos nesse trabalho também tiveram equações significativas e demonstraram elevado coeficiente de dispersão (Figura 31a e 31b), demonstrando possível as estimativas dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água do ar.

Tabela 3. Correlação (r), significância (p -valor), coeficiente de Willmott (d), erro médio (EM) e erro médio percentual (EMP) entre as medidas realizadas com os sensores protótipos e os comerciais.

Sítio	Medidas de Erro	r	p -valor	d	EM	EMP
Área Urbana	Rg	0.99	< 0,001	1.00	0.00	0.00
	Rn	0.99	< 0,001	1.00	0.00	0.00
	G	0.97	< 0,001	0.98	0.00	0.00
	T	1.00	< 0,001	1.00	0.00	0.00
	UR	1.00	< 0,001	1.00	0.00	0.00
Área de Cana-de-açúcar	Rg	1.00	< 0,001	1.00	0.00	0.00
	Rn	0.99	< 0,001	1.00	0.00	0.00
	G	0.91	< 0,001	0.95	0.00	0.00
	T	1.00	< 0,001	1.00	0.17	0.00
	UR	1.00	< 0,001	1.00	1.45	0.00

4.3. CUSTO DO DESENVOLVIMENTO DA ESTAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA

O custo dos sensores e *datalogger* desenvolvidos (Tabela 4) apresentaram valores muito abaixo dos sensores comerciais (Tabela 5) usados como referência.

Tabela 4. Custo dos sensores e *datalogger* desenvolvidos.

Equipamentos	Custo (R\$)
Piranômetro	40,00
Radiação Solar Líquida	50,00
Fluxímetro de Calor no Solo	50,00
Termohigrômetro	53,00
<i>Datalogger</i>	528,00
Total	721,00

Tabela 5. Custo dos equipamentos importados usados como referência no desenvolvimento da estação micrometeorológica.

Equipamentos	Custo (R\$)
Piranômetro LICOR LI-200	1.500,00
Radiação Solar Líquida KIPP & ZONEN, NRLITE2	5.000,00
Fluxímetro de Calor no Solo HUKSFLUX HFP01-L34-PT	2.500,00
Termohigrômetro HMP45C	2.700,00
<i>Datalogger</i> CR1000	5.000,00
Total	16.700,00

O custo da estação desenvolvida representou 4,3% do custo dos equipamentos referência. Deve-se ressaltar que o custo de construção não levou em conta o custo de operação do torno e nem o serviço de construção.

O sistema de carga da bateria garantiu o funcionamento ininterrupto do sistema mantendo a bateria sempre acima dos 12 volts mesmo em dias com pouca luminosidade.

4.3. ANÁLISE DAS MEDIDAS COM OS SENSORES DESENVOLVIDOS

A radiação solar incidente nos dois sítios experimentais ocorreram entre 06:30 e 17:00 horas sendo que o máximo foi observado às 12:00 horas com aproximadamente 800 Wm^{-2} (Figura32a). O comportamento das curvas de radiação incidente apresentaram pequenas variação no padrão diário que podem ser atribuídas

ao fator nebulosidade, visto que a presença de nuvens provoca redução do fluxo radiativo em virtude da alternância de períodos com nebulosidade e céu limpo.

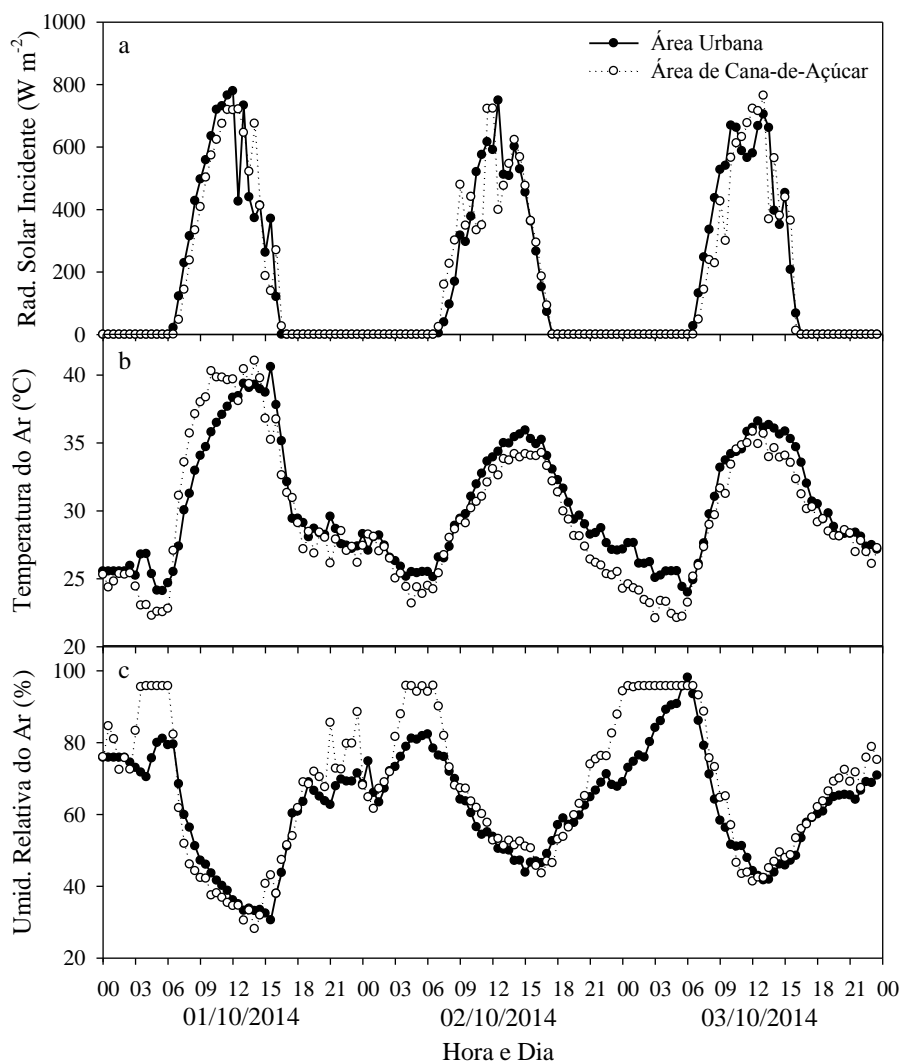


Figura 32.Variação horária da (a) radiação solar incidente, (b) temperatura do ar e (c) umidade relativa do ar medidas na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

A temperatura do ar na área urbana apresentou temperaturas mínimas e máximas diárias ligeiramente superiores à área de cana-de-açúcar (Figura 32b). A temperatura do ar mínima ocorreu às 06:30 horas, quando iniciou a aumentar devido à radiação incidente, e atingiu máximo diário entre 12:00 e 15:00 horas, sendo influenciada pela nebulosidade entre 09:00 e 15:00 horas.

O rápido declínio da temperatura diária se deu entre 15:00 e 16:00 horas com

queda acentuada de 3 °C em duas horas, coincidindo com o termino da radiação incidente. A queda da temperatura no período noturno ocorreu lentamente mantendo o mesmo padrão em ambos os sítios experimentais. No entanto, a temperatura do ar foi menor na área de cana-de-açúcar durante o período noturno.

Dentre os fatores que influenciam para estas diferenças entre os dois sítios, pode-se citar os materiais predominantes da área urbana tais como calçadas, asfalto e concreto das edificações, que armazenam e conduzem mais rapidamente o calor no período diurno que solo nu ou superfícies vegetadas (Alvese Vecchia, 2012), e reemitindo o calor em todas as direções durante o período noturno (Souza et al, 2012). Esse comportamento da temperatura do ar também foi verificado por (Callejas, 2012), quando avaliou diferentes tipos de ambientes urbanos na cidade de Cuiabá devido a urbanização.

A umidade relativa nos dois sítios experimentais também apresentou o mesmo comportamento no período diurno em fase e amplitude (Figura 32c). A marcha diária da umidade relativa do ar nos dois sítios experimentais inicia sua queda com o início da radiação solar e tem o mínimo diário coincidente com o máximo de temperatura, e tornando a subir com o declino da temperatura. A umidade relativa do ar na cana-de-açúcar foi maior no período noturno em todos os dias estudados, atingindo 95% quando a temperatura do ar esteve abaixo de 25°C. Enquanto que na área urbana, por apresentar maior área do entorno com alvenaria com maior capacidade de acumular energia térmica nas estruturas, apresentou menores valores de umidade relativa do ar no período noturno.

4.4. ANÁLISE DO BALANÇO DE ENERGIA PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN

O saldo de radiação seguiu a tendência da radiação solar incidente com valores positivos entre 06:30 e 17:00 horas, atingindo máximo às 12:00 horas com 640W m⁻² e 610 W m⁻² na cana-de-açúcar e área urbana, respectivamente, com flutuações devido à nebulosidade local (Figura 33a). No período noturno, o saldo de radiação foi negativo nos dois sítios experimentais, devido os fluxos de radiação de onda longa no sentido ascendente a partir do solo serem maiores que os provenientes

da atmosfera.

Os menores valores do saldo de radiação durante o período noturno foram verificados na área de cana-de-açúcar. A vegetação atua como termorregulador da superfície por ter ao maior calor específico que a superfície da área urbana em função da maior quantidade de água presente na biomassa. A área urbana aprisiona maior quantidade de energia durante o período diurno, mas perde rapidamente durante as primeiras horas do período noturno. Dessa forma, a superfície vegetada apresenta maior diferença de temperatura com a atmosfera durante o período noturno que a área urbana.

O fluxo de calor no solo foi menor na área da cana-de-açúcar, representando em média de 1% do saldo de radiação ao longo dos três dias, enquanto que na área urbana representou 31% do saldo de radiação (Figura 33b). O fluxo de calor no solo foi negativo durante o período noturno, sendo positivo a partir das 09:00 horas com máximo às 15:00 horas, indicando que a superfície transmite energia para as camadas mais profundas do solo, voltando a ser negativo após às 16 horas, quando o solo começa a perder calor para a atmosfera novamente.

Os menores valores do fluxo de calor no solo na área da cana-de-açúcar ocorreram devido à atenuação da radiação solar que atinge a superfície pela vegetação, o que não ocorreu na área urbana. Dessa forma, o fluxo de calor no solo na área de cana-de-açúcar teve valores muito próximos de zero durante a maior parte do período diurno com pico máximo de 45 W m^{-2} com a atmosfera livre de nebulosidade. Esses valores foram bem próximos dos 58 W m^{-2} encontrados por (Romisio et al, 2010) e (Ferreira et al, 2013) para o cultivo da cana de açúcar para o mesmo estado fonológico em condição de seca. Quanto à comparação entre área urbana e vegetada outros autores também encontraram valores semelhantes aos desse trabalho, como (Souza et al.,2013) na cidade de Ourinhos-SP, e (Andrade et al.,2007) nas cidades de Petrolina-PE, Juazeiro-BA e Juiz de Fora- MG, os quais compararam o microclima urbano com de áreas vegetadas.

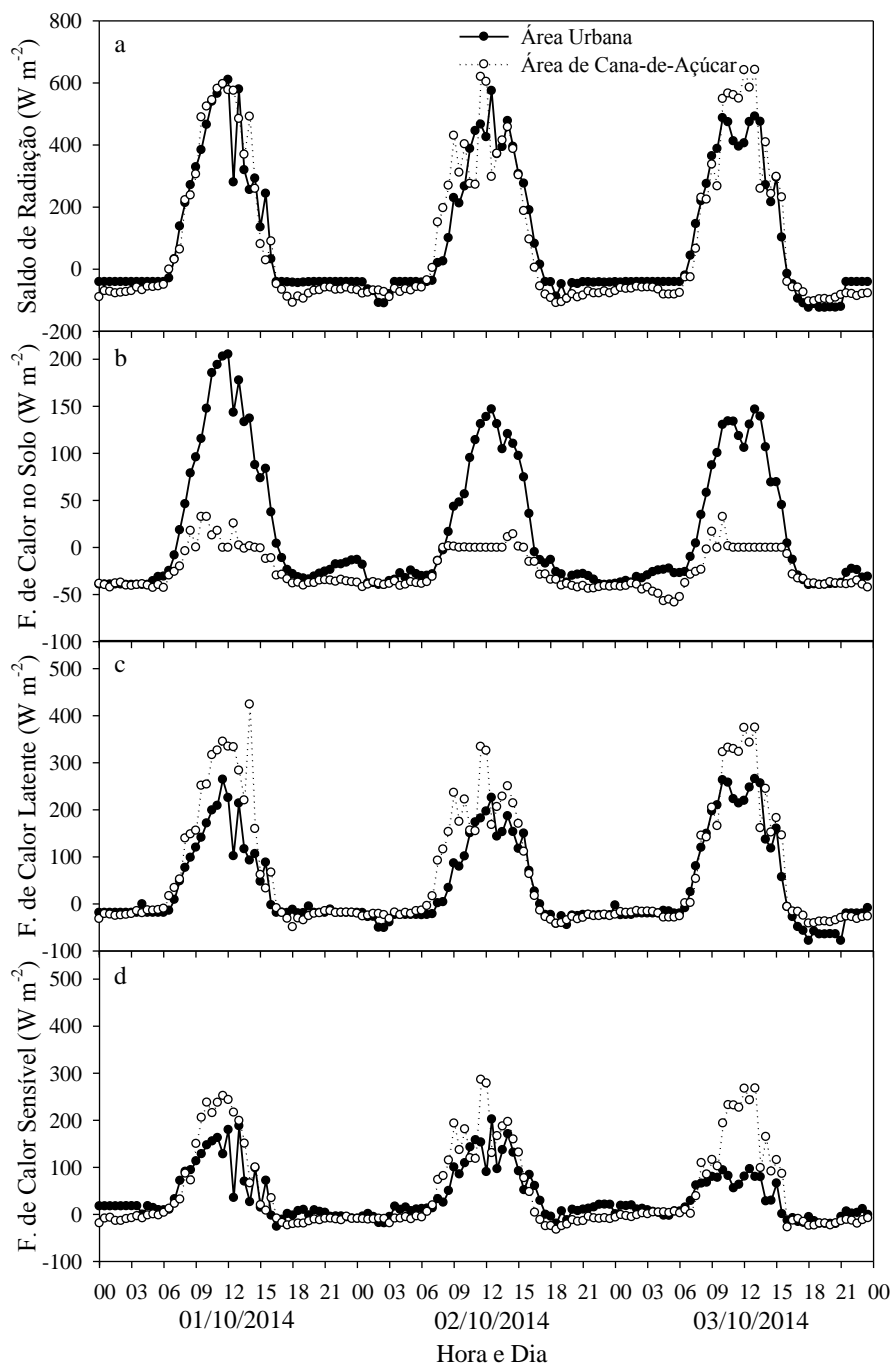


Figura 33. Variação horária do (a) saldo de radiação, (b) fluxo de calor no solo, (c) fluxo de calor latente e (d) fluxo de calor sensível medidos e estimados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

O curso horário do fluxo de calor latente nos dois sítios experimentais (Figura 33c), apresentaram comportamento semelhante ao saldo de radiação nos dias

analisados, porém com intensidade diferente uma vez que o fluxo de calor latente da área de cana-de-açúcar foi maior que na área urbana, representando em média de 58% do saldo de radiação ao longo dos três dias, enquanto que na área urbana o fluxo de calor latente representou 44% do saldo de radiação. A diferença na magnitude do fluxo de calor latente entre os sítios experimentais foi devida, basicamente, pela característica da própria superfície. A superfície vegetada normalmente utiliza maior parte da energia disponível para o processo de evapotranspiração (Biudes et al., 2009; 2015), enquanto que a superfície quase toda impermeabilizada, como na área urbana, utiliza a maior parte da energia disponível para o processo de aquecimento da superfície.

O fluxo de calor sensível nos dois sítios experimentais também apresentou comportamento semelhante ao saldo de radiação (Figura 33d). No entanto, ao contrário do que se esperava, o fluxo de calor sensível foi maior na área de cana-de-açúcar, representando em média de 41% do saldo de radiação ao longo dos três dias, enquanto que o fluxo de calor sensível na área urbana representou 26% do saldo de radiação.

A inversão na distribuição da energia disponível em fluxo de calor sensível é observada se o foco for somente nesse componente do balanço de energia. Se totalizar a energia disponível para aquecimento, i.e. fluxo de calor no solo e sensível, observa-se a premissa da energia usada para aquecimento ser maior na área urbana. A energia disponível para aquecimento do solo (fluxo de calor no solo) e do ar (fluxo de calor sensível) foi maior na área urbana, representando em média de 56% do saldo de radiação ao longo dos três dias, enquanto que na área de cana-de-açúcar representou 42% do saldo de radiação (Figura 34).

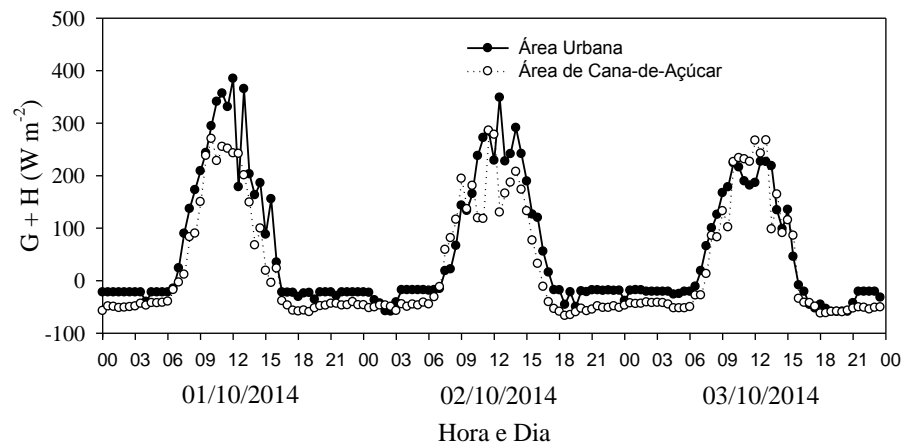


Figura 34. Variação horária da soma do fluxo de calor no solo e do fluxo de calor sensível medidos e estimados na área urbana e de cana-de-açúcar no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

5. CONCLUSÃO

O custo total dos equipamentos desenvolvidos foi de R\$721,00 sendo 4,3% do custo de equipamentos importados.

Os sensores desenvolvidos; piranômetro, saldo radiômetro, e fluxímetro apresentaram elevada correlação indicando a viabilidade de uso dos sensores em estações micrometeorológicas.

A radiação solar incidente nos dois sítios atingiu o valor máximo às 12:00 horas com aproximadamente 800 Wm^{-2} com pequenas variações provocadas em virtude da alternância de períodos com nebulosidade e céu limpo.

A temperatura do ar na área urbana apresentou temperaturas mínimas e máximas diárias ligeiramente superiores à área de cana-de-açúcar.

A umidade relativa do ar na cana-de-açúcar foi maior no período noturno em todos os dias estudados. No período diurno a umidade relativa apresentou o mesmo comportamento em fase e amplitude nos sítios experimentais.

O saldo de radiação seguiu a tendência da radiação solar, atingindo o máximo às 12:00 horas com 640 W m^{-2} e 610 W m^{-2} na cana-de-açúcar e área urbana.

O fluxo de calor no solo na área da cana-de-açúcar, representou em média de 1% do saldo de radiação ao longo dos três dias, enquanto que na área urbana representou 31% do saldo de radiação.

O fluxo de calor latente nos sítios experimentais apresentaram, 58% do saldo de radiação na área de cana-de-açúcar e 44% na área urbana.

O fluxo de calor sensível foi maior na área de cana-de-açúcar, representando em média de 41% do saldo de radiação e 26% na área urbana.

Apesar dos resultados das medidas do protótipo serem semelhantes às feitas pelos sensores comerciais, mais testes são necessários para ajustes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M., **Evapotranspiración del cultivo – Guía para La determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma, 2006. 298p. (FAO IrrigationandDrainagePaper 56)

ALVES, E. D. LIMA.; VECCHIA, F.A. S.Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental. **Revista AMBIÊNCIA** v. 8, n. 1. p. 101- 111, 2012.Guarapuava-Paraná.

ANDRADE, RICARDO GUIMARAES.; SEDIYAMA, GILBERTO CHOHAKU.; DELGADO, RAFAEL COLL .;LIMA, EVALDO DE PAIVA.; MENEZES, SADY JUNIOR MARTINS DA COSTA DE. Saldo de radiação e fluxo de calor no solo na região do município de Juiz de Fora, MG. 1. (SERHIDRO), 2007. Anais **I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**. Taubaté: IPABHi, 2007. p. 371-373. CD-ROM, ISSN 1982-1751; On-line.

ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; DALL’OLIO, A.; AUDRY, P.; PINTO, A.X.M. Influência do posicionamento de sondas térmicas na determinação da difusividade térmica e do fluxo de calor do solo em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.165-172, 1997.

BALDOCCHI, D.D.; HICKS, B.B.; MEYERS, T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v.69, n.5, p.1331-1340, 1988.

BASTABLE, H.G.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DALLAROSA, R.L.G.; FISCH, G.;

NOBRE, C.A. Observations of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian Forest. **International Journal of Climatology**, v.13, p.783-796, 1993.

BERKOWICZ, R.; PRAHM, L.P. Sensible heat flux estimated from routine meteorological data by the resistance method. **American Meteorological Society**, v.21, n.12, p.1845-1864, 1982.

BETTS, A.K.; DESJARDINS, R.L.; WORTH, D. Impact of agriculture, forest and cloud feedback on the surface energy budget in BOREAS. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, p.156-169, 2004.

BIUDES, MARCELO SACARDI; VOURLITIS, GEORGE LOUIS; MACHADO, NADJA GOMES; ARRUDA, PAULO HENRIQUE ZANELLA DE; NEVES, GERALDO APARECIDO RODRIGUES; LOBO, FRANCISCO DE ALMEIDA; NEALE, CHRISTOPHER MICHAEL USHER; NOGUEIRA, JOSÉ DE SOUZA. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, V.202, p.112–124, March, 2015.

CALLEJAS, IVAN JULIO APOLONIO. **Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT**. 2012.242f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso 2012.

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R. Balanço de energia em cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.1, p.1-14, 1996.

DIAS, CARLOS ALBERTO ANTUNES. **PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DE UMA TORRE MICROMETEOROLÓGICA EM SINOP-MT** 2007.89 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, MT. 2007.

FERNANDES, ALBERTO EMANUEL SIMÕES DOS SANTOS. **CONVERSÃO DE ENERGIA COM CÉLULAS DE PELTIER**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis - Conversão Elétrica e Utilização Sustentáveis) - Faculdade de Ciências e Tecnologia de Lisboa, 2013.

FERREIRA, A. S.; SIMÕES, M. ;MENDONÇA, J. C. ESTIMATIVAS DOS FLUXOS DE ENERGIA EM ÁREAS COM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SOJA NA MESORREGIÃO DO SUL GOIANO. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil**, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; SILVA, I.F. Estimativa da evapotranspiração em uma cultura de feijão caupi, nas condições de brejo Paraibano. **Agropecuária Técnica**, v.26, n.2, p.86-92, 2005.

LORO NETO, ABRAMO. **DESENVOLVIMENTO DE MEDIDORES DE RADIAÇÃO SOLAR DIRETA**. 1996. 69 f .Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa , MG. 1996.

MARTÍNEZ, M. A., ANDÚJAR J. M.; ENRIQUE J. M. **A NEW AND INEXPENSIVE PYRANOMETER FOR THE VISIBLE SPECTRAL RANGE** 2009. DIESIA, Escuela Politécnica Superior de La Universidad de Huelva, Ctra. Palos de laFtra.-Huelva s/n.

MONCRIEFF, J.B.; MALHI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. **Global Change Biology**, v.2, p.231-240, 1996.

MONTEITH J.L.; UNSWORTH, M.H. Principles of environmental physics.London: **Edward Arnold Publishers**, 1990. 291p.

MOURA, JOSE AMERICO DE SOUSA. **FILMES NANOMÉTRICOS DE FEN**

E ALN CRESCIDOS POR SPUTTERING E APLICAÇÕES DO EFEITO PELTIER 2010.114 f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

NEVES G. A. R. **DESENVOLVIMENTO DE ESTAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA COM ARMAZENAMENTO DE DADOS.** 2011.61 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso 2011

OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R. Estimativas de evapotranspiração e as conseqüências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** vol.4, n.3, Campina Grande Sept./Dec. 2000

ORTEGA FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.81, p.131-143, 1996.

PAES, TIAGO FRANCA. **SISTEMAS DE CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS SENSORES PARA RADIÔMETROS FOTOVOLTAICOS** 2012. 125f. mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e sensores- Instituto nacional de pesquisas espaciais. São José dos Campos, SP. 2012

PALMIERI A. M. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA COLETA E ARMAZEMAMENTO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS: APLICAÇÕES NO AMBIENTE AGRÍCOLA.** 2009 101 f Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” 2009

PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.97, n.3, p.141-50, 1999.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Balanço de energia em vinhedo de 'Niagara Rosada'. **Bragantina**, v.62, n.1, p.155-161, 2003.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G.L.; HAYASHI, M.M.S.; NOGUEIRA, J.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; NUNES, P.C.; SOUZA, L.S.; COUTO, E.G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J.L.; MIRANDA, E.J.; PRIANTE, P.C.; FRITZEN, C.L.; LACERDA, M.; PEREIRA, L.C.; BIUDES, M.S.; SULI, G.S.; SHIRAIWA, S.; PAULO, S.R.; SILVEIRA, M. Comparison of the mass and energy Exchange of a pasture and a mature transitional tropical Forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, v.10, p.863-876, 2004.

ROMISIO, GERALDO BOUHID ANDRÉ.; MENDONÇA, JOSÉ CARLOS.; PINHEIRO, FRANCISCA MARIA ALVES.; MARQUES, VALDO DA SILVA.; E JOSÉ MARQUES. **ASPECTOS ENERGÉTICOS DO DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR. PARTE 2: BALANÇO DE ENERGIA E PARÂMETROS DERIVADOS**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.4, p, 535 - 542, 2010.

SÁ, L.D.A.; VISWANADHAM, Y.; MANZI, A.O. Energy flux partitioning over the Amazon Forest. **Theoretical and Applied Climatology**, v.39, p.1-16, 1988.

SANTOS, LEONARDO PAIVA. **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM GERADOR TERMOELÉTRICO BASEADO NO EFEITO SEEBECK** . 2010. 45f Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté.2010

SILVA, JACQUELLINE MARQUES da. **Sensores De Temperatura do Tipo NTC À Base De Mistura Mecânica De Óxidos De Níquel, Cobalto E Manganês**. XIX Encontro Anual de Iniciação Científica (EAIC) Anais UNICENTRO2010. Guarapuava PR.

SOUZA, DÉBORA MOREIRA DE; CARFAN, ANA CLAUDIA; NERY, JONAS

TEIXEIRA. ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR E DE FLUXOS DE CALOR NOMUNICÍPIO DE OURINHOS, UTILIZANDO O MODELO ENVI-MET. REVISTA GEONORTE, Edição Especial, V.2, N.4, p.723 – 733, 2012.

TANNER, C.B.; LEMON, E.R. Radiant energy utilized in evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.54, n.3, p.207-212, 1962.

THORNTHWAITE, C.W.; HOLZMAN, B. The determination of evaporation from land and water surfaces. **Monthly Weather Review**, v.64, n.1, p.4-11, 1939.

UNLAND, H.E.; HOUSER, P.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; YANG, Z. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p.119-153, 1996.

VERMA, S. B., ROSENBERG, N. J., BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. **Journal of Applied Meteorology**, v.17, p.330-338, 1978.

VILIOTTI, CARLOS A. SUGAWARA, MÁRCIOT. MANTOVANI, EVERARDOC.VICENZI, MARLOS S. **Estudo de Um Sensor Para Medição da Umidade Relativa Em Sistemas Agrícolas**. XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA 2014, Campo Grande - MS, Brasil,

ZHANG, Y.; LIU, C.; SHEN, Y.; KONDOH, A.; TANG, C.; TANAKA, T.; SHIMADA, J. Measurement of evapotranspiration in a winter wheat field. **Hydrological Processes**, v.16, p.2805-2817, 2002.