

GUSTAVO FINHOLDT

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO
METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA
PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.


VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

GUSTAVO FINHOLDT


**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO
METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA
PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 29 de julho de 2008.



Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Co-Orientador)




Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro



Prof. Sérgio Zolnier



Pesq. Antonio José Steidle Neto



Prof. Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

DEDICO

A meu querido pai, por ser o braço forte da família, olhando e cuidando de todos, com tanto amor.

À minha amada mãe, por ser a mistura de amor, carinho, dedicação e fidelidade, meu exemplo de vida, renúncia, amor e carinho.

Ao meu querido irmão Emerson, por ser o segundo braço forte da família, que está sempre pronto para auxiliar, para dar uma palavra de estímulo e até um puxão de orelha.

O irmão, o pai, o filho, o marido e, principalmente, o amigo, partiu; deixando todos com muitas saudades! Mas, com a certeza de um reencontro em sua nova morada, aguardamos a oportunidade de recebermos esse presente tão divino. Ao meu querido irmão Renan que dos céus olha por nós.

Aos meus queridos sobrinhos Leo e Larissa, que são motivo de muita alegria e felicidade para mim, hoje e sempre.

À minha afilhada Marcela que ainda nem nasceu e já traz tanta luz em forma de felicidade para todos da minha família.

Os obstáculos da vida são as dádivas que Deus nos dá para um aprendizado correto e ordenado, para burilar o espírito!

Poucas são as palavras, mas infinito é o verdadeiro amor que sinto por todos vocês. Que Deus os guie e os proteja, hoje e sempre.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todos os obstáculos que colocou em meu caminho, tendo sido fáceis ou difíceis, proporcionando-me maior aprendizado pessoal e profissional.

À minha amada família que me proporcionou todo o carinho e amor, mesmo a distância, fortificando-me para a difícil transposição dos obstáculos.

Ao estimado amigo e professor Everardo Chartuni Mantovani, pelas oportunidades, pelos apoios e ensinamentos, pessoais e profissionais.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Às empresas Irriger Tecnologia e Serviços de Irrigação Ltda. e Irriplus Equipamentos Científicos Ltda., pelo apoio financeiro e pela oportunidade de desenvolver tal projeto em suas dependências; e aos seus colaboradores, pela amizade e auxílio no desenvolvimento deste projeto; em especial a Jackson Soares dos Santos, Francisco Carlos Alves Neto e Adalberto Santos Pinto da Paixão, pelo auxílio com determinação durante o projeto; e a Francisco Papa da Silva, pela sua grandiosidade como pessoa e amigo.

Ao estimado amigo e professor Luis César Dias Drumond, pela amizade e confiança.

Ao estimado amigo Paulo Márcio Pereira de Carvalho, pela amizade, pela confiança e pelos ensinamentos pessoais e auxílio no desenvolvimento deste projeto.

Aos amigos do Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada (GESAI), pela amizade e pelo companheirismo.

À Claudilene Lima de Abreu, pelo companheirismo, dedicação e compreensão nos momentos difíceis.

Aos professores Derly José Henriques da Silva, Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Gilberto Chohaku Sedyama, Márcio Mota Ramos, Paulo José Hamakawa e Sérgio Zolnier, pelos ensinamentos pessoais e acadêmicos.

BIOGRAFIA

GUSTAVO FINHOLDT, filho de Carlos Finholdt Júnior e Vera Lúcia do Nascimento Finholdt, nasceu em 3 de dezembro de 1978, na cidade de Uberaba, MG, Brasil.

Em 1994, ingressou no curso de Habilitação Profissional de Técnico em Processamento de Dados, concluindo-o em 1997.

Em 1998, iniciou o curso técnico de Informática Industrial, concluindo-o em 1999.

Nesse mesmo ano, iniciou o curso de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Industrial, na Universidade de Uberaba, concluindo-o em 2003.

Em fevereiro de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola, na área de Concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa, MG, submetendo-se à defesa da dissertação em 29 de julho de 2008.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. – INTRODUÇÃO	1
2. – REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. – Evapotranspiração	5
2.2. – Meteorologia	6
2.3. – Equipamentos	8
2.4. – Metrologia	9
2.5. – Eletrônica	11
2.6. – Comparação dos dados.....	15
3. – MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. – Desenvolvimento da estação meteorológica automática	16
3.2. – Calibração dos sensores	34
3.2.1. - Anemômetro	34
3.2.2. - Higrômetro	35
3.2.3. - Pluviômetro	36
3.2.4. - Piranômetro	37
3.2.5. - Termômetro	38
3.3. – Comparação dos dados fornecidos pela estação meteorológica automática	38
4. – RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5. – CONCLUSÃO	51
6. – REFERÊNCIAS	52
APÊNDICES	55
APÊNDICE A	56
APÊNDICE B	57
APÊNDICE C	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	– Evolução do número de habitantes do Brasil de 1550 até 2007	1
Figura 2	– Diagrama simplificado da EMA proposta	17
Figura 3	– Circuito condicionador de sinais do painel solar	18
Figura 4	– Circuito condicionador de sinal da bateria	19
Figura 5	– Circuito de alimentação e filtro do higrômetro, juntamente com circuito condicionador de sinais do sensor de temperatura	21
Figura 6	– Abrigo termométrico desenvolvido no experimento	21
Figura 7	– Piranômetro desenvolvido no experimento	22
Figura 8	– Anemômetro desenvolvido no experimento	23
Figura 9	– Circuito de polarização do tipo <i>pull-up</i> , do anemômetro	23
Figura 10	– Pluviômetro desenvolvido no experimento com detalhe na balança	24
Figura 11	– Esquema elétrico completo da EMA	27
Figura 12	– Circuito eletrônico da EMA montado no protoboard MP-2420	27
Figura 13	– <i>Layout</i> da placa de circuito impresso da E3000	28
Figura 14	– Placa de circuito impresso da EMA com os componentes eletrônicos soldados	29
Figura 15	– Caixa eletrônica da EMA montada	30
Figura 16	– EMA desenvolvida com destaque para o posicionamento dos sensores.	30
Figura 17	– Tela inicial do programa E3000AD	31
Figura 18	– Tela de configuração do E3000AD	32
Figura 19	– Tabela do banco de dados do E3000AD	33

Figura 20 – Plotagem dos dados no programa E3000AD	33
Figura 21 – Aferição do higrômetro desenvolvido	35
Figura 22 – Calibração do pluviômetro desenvolvido	37
Figura 23 – Equipamentos utilizados na calibração do piranômetro desenvolvido ...	38
Figura 24 – Instalação da EMA desenvolvida ao lado da EMA do INMET	39
Figura 25 – Instalação da EMA desenvolvida ao lado da estação meteorológica convencional	40
Figura 26 – Diagrama de dispersão dos dados do anemômetro desenvolvido	43
Figura 27 – Diagrama de dispersão dos dados do higrômetro	44
Figura 28 – Diagrama de dispersão dos dados do piranômetro desenvolvido	45
Figura 29 – Diagrama de dispersão dos dados do termômetro desenvolvido	45
Figura 30 – Gráfico de comparação dos dados horários de umidade relativa do ar ...	46
Figura 31 – Gráfico de comparação dos dados horários de temperatura do ar	47
Figura 32 – Gráfico de comparação dos dados horários de velocidade do vento	47
Figura 33 – Gráfico de comparação dos dados horários de irradiância solar	48
Figura 34 – Gráfico de comparação da umidade relativa do ar e temperatura ambiente	48
Figura A1 – Gráfico de sensibilidade espectral relativa <i>versus</i> comprimento de onda do sensor de irradiância	56
Figura B1 – Gráfico de comparação dos dados de umidade relativa do ar das EMAs	57
Figura B2 – Gráfico de comparação dos dados de temperatura do ar das EMAs	58
Figura B3 – Gráfico de comparação dos dados de velocidade do vento das EMAs ...	58
Figura B4 – Gráfico de comparação dos dados de irradiância solar das EMAs	59
Figura B5 – Gráfico de comparação dos dados de precipitação das EMAs	59

RESUMO

FINHOLDT, Gustavo, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2008.
Desenvolvimento e avaliação de uma estação meteorológica automática para manejo de irrigação. Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Co-Orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e Márcio Mota Ramos.

Devido ao crescente aumento populacional mundial, a agricultura irrigada é uma importante estratégia para maior produção de alimentos, fibras e agroenergia. A determinação da lâmina de irrigação por meio de estudos da evapotranspiração da cultura (ETc) tem sido uma tecnologia amplamente divulgada e utilizada em razão da sua operacionalidade. Para tal, é necessário que se determine a evapotranspiração de referência (ETo) que é obtida com dados advindos de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA), com base na equação FAO Penman-Monteith, que tem grande potencial de redução no consumo da água e da energia elétrica nas irrigações, além de reduzir o potencial de degradação ambiental e de utilização da mão-de-obra. No entanto, as estações automáticas são tecnologias normalmente importadas, com alto custo de aquisição e manutenção, que apresentam ainda dificuldades de acesso aos serviços de manutenção, deficientes e pouco disponíveis. Dessa forma, desenvolveu-se uma Estação Meteorológica Automática com tecnologia nacional. A estação foi projetada com os cinco sensores básicos (velocidade do vento, precipitação, umidade relativa do ar, irradiância solar e temperatura ambiente) para calcular o balanço hídrico, sendo dois parâmetros importantes: a precipitação pluvial e a ETo. O equipamento desenvolvido possibilita a visualização dos dados no próprio equipamento ou em um

microcomputador. Após o desenvolvimento do equipamento, realizou-se a calibração dos sensores, atingindo coeficientes de correlação (r) de 1,000; 0,998; 0,999; 0,995; e 1,000, para os sensores de vento, chuva, umidade relativa, radiação e temperatura, respectivamente. Em seguida, avaliou-se o equipamento no período de 17/05 a 12/06/2008, na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalada no campus da Universidade Federal de Viçosa. Os dados foram comparados tomando-se como referência os dados da EMA do INMET, modelo MAWS301 (fabricante Vaisala), instalada ao lado do equipamento desenvolvido. As estimativas de coeficiente de correlação (r), erro de viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram utilizadas para avaliar o funcionamento do equipamento. Com a comparação dos dados dos equipamentos, obtiveram-se os seguintes coeficientes de correlação: 0,911; 0,999; 0,993; 0,998; e 0,987, respectivamente dos sensores anemômetro, pluviômetro, higrômetro, piranômetro e termômetro. Conclui-se que os sensores desenvolvidos proporcionaram resultados adequados e a estação meteorológica automática apresentou condições confiáveis de medição e armazenamento dos dados meteorológicos.

ABSTRACT

FINHOLDT, Gustavo, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2008.
Development and evaluation of an automatic meteorological station for irrigation management. Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama and Márcio Mota Ramos.

Due to the increasing world population growth, irrigated agriculture is an important strategy to increase food, fiber and agro-energy production. Because of its operability, irrigation levels determination by means of culture evapotranspiration studies (ETc) has been a widely disseminated and applied technology. Thus, it is necessary to determine a reference evapotranspiration (ETo), which is obtained through data supplied by the Automatic Meteorological Stations (AMS), based on the FAO Penman-Monteith equation, which has a great potential of reducing water consumption and electric energy in irrigation, in addition to reducing potential environmental degradation and labor use. However, the automatic stations are normally imported technologies, with high cost and maintenance, also presenting difficulties in access to maintenance, which is deficient and scarce. Thus, an Automatic Meteorological Station was developed using national technology, designed with five basic sensors (wind velocity, rainfall, air relative humidity, solar irradiance and ambient temperature) to calculate water balance, based on two main parameters: rainfall and ETo. The equipment developed allows data visualization in the equipment itself or in a microcomputer. After the equipment was developed, the sensors were calibrated reaching correlation coefficients (r) of 1,000; 0,998; 0,999; 0,995; and 1,000 for the

wind, rainfall, air relative humidity, radiation and temperature sensors, respectively. The equipment was evaluated from 05/17/2008 to 06/12/ 2008 at the meteorological station of the National Institute of Meteorology (INMET) installed on the Universidade Federal de Viçosa campus. The data were compared taking as reference the INMET's EMA data, model MAWS301 (manufacturer, Vaisala), installed close to the equipment developed. The correlation coefficient estimates (r), mean bias error (MBE) and Root Mean Square Error (RMSE) were used to evaluate the equipment at work. Comparing the equipment data, the following correlation coefficients were obtained: 0.911; 0.999; 0.993; 0.998; and 0.987 of the sensors anemometer, pluviometer, hygrometer, pyranometer and thermometer, respectively. It was concluded that the sensors developed provided adequate results and that the automatic meteorological station developed presented reliable meteorological data measuring and storing conditions.

1. INTRODUÇÃO

É crescente o número de habitantes no planeta. Em 2007, a população mundial atingiu cerca de 6,6 bilhões de pessoas, das quais 184 milhões são brasileiros, de acordo com informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007). Apresenta-se na Figura 1 a evolução do crescimento populacional brasileiro de 1550 a 2007, sendo observado aumento expressivo na taxa de crescimento nos últimos 50 anos.



Figura 1 – Evolução do número de habitantes do Brasil de 1550 até 2007.

Fonte: IBGE.

Tal crescimento exige aumento contínuo na produção de alimentos, que, além de atender ao mercado interno, possa gerar superávit visando à exportação. Para isso, tem-se buscado não só a expansão da área plantada, como também a intensificação dos plantios e o aumento das produtividades médias nas áreas produtoras.

De acordo com o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2007), a área utilizada para a agricultura e pecuária representava 9,0 e 20,2% do território brasileiro, respectivamente.

Segundo Gorayeb et al. (2005), o desmatamento da bacia do Curu está relacionado ao extrativismo vegetal, à expansão de fronteiras agropecuárias e às atividades de aqüicultura. De acordo com Castro (2005), a principal tendência de desmatamento das florestas do Amazonas é causada por atividades agropecuárias, com foco principal na conversão de florestas em pastagens e em áreas degradadas, sendo essas, recentemente, substituídas por monocultura de grãos. Tal modelo tem sido questionado, e é indispensável o aumento da produtividade como forma principal de aumento da produção de alimentos no Brasil e no Mundo, devendo a expansão ocorrer em áreas de baixo aproveitamento, como é o caso de pastagens degradadas.

A irrigação é definida por Mantovani et al. (2007a) como uma das estratégias adotadas visando ao aumento da produção, produtividade e rentabilidade da propriedade agrícola de forma sustentável, preservando o meio ambiente e criando condições para manutenção do homem no campo, mediante a geração de empregos permanentes e estáveis.

Segundo Bernardo et al. (2007), no passado a irrigação era utilizada apenas como uma técnica de aplicação de água nas culturas que visava principalmente à luta contra a seca. Atualmente, ela é uma das técnicas mais recomendadas para aumentar a produtividade de uma cultura, pois possibilita sua utilização nas mais diversas condições de solo e clima.

O produtor rural, no entanto, usualmente não adota métodos adequados de controle da irrigação, irrigando em excesso suas culturas, temendo que estas sofram estresse hídrico, o que poderá comprometer a produção devido a problemas no sistema radicular e doenças. Além dos danos à cultura, irrigações em excesso têm como consequência o desperdício de energia e de água, causando prejuízos financeiros e ambientais, como a lixiviação de nutrientes e riscos de contaminação de lençóis freáticos (MANTOVANI et al., 2007b).

Nesse contexto, a utilização dessa técnica vem evoluindo consideravelmente ao longo dos anos, tanto com relação a seu uso, em termos de área irrigada, quanto ao aspecto tecnológico (MANTOVANI et al., 2006).

Mantovani et al. (2007a) afirmaram que mais da metade da população mundial depende de alimentos produzidos em áreas irrigadas. Assim, observa-se que existe a necessidade de um programa de gerenciamento de irrigação que auxilie os produtores a utilizarem melhor as técnicas de manejo da irrigação, garantindo elevadas produtividades com o uso racional de água e energia.

Segundo Mantovani et al. (2007b), o significado do termo gerenciamento da irrigação é complexo e tem permitido várias interpretações. Portanto, dentro de um conceito de manejo da irrigação, é visto como a implantação de uma série de medidas e procedimentos que visam saber quanto e quando irrigar. Em um contexto mais abrangente e atendendo às necessidades e dinâmicas da agricultura atual, o manejo da irrigação deve ser analisado com uma visão mais ampla, que integre outros conhecimentos e respostas, o que tem sido denominado visão integrada. Neste caso, saber quando e quanto irrigar é um processo de tomada de decisão que contempla outros aspectos, como avaliação do sistema de irrigação, preocupação com aspectos fitossanitários e de pragas, nutrição etc., o que se denomina gerenciamento de irrigação.

Para um bom gerenciamento de irrigação, faz-se necessário utilizar técnicas que calculem com exatidão a quantidade de água evapotranspirada. A FAO tem apresentado publicações em que se busca a padronização de metodologias de cálculo da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A metodologia de cálculo da evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), segundo Mantovani e Vicente (2007), é a mais empregada para estimar as necessidades hídricas das culturas. Essa metodologia é dividida em duas etapas: a primeira é a estimativa da evapotranspiração de uma cultura de referência (E_{To}), geralmente determinada por método empírico (ALLEN et al., 1998); e a segunda é conhecida ao multiplicar a E_{To} por um coeficiente de cultura (K_c), considerando-se o estágio de desenvolvimento da planta que integra as características da cultura e do clima (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A metodologia recomendada como padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência (E_{To}) é o método FAO (1998). Por meio deste método, calcula-se a E_{To}

com base em dados meteorológicos, sendo eles: irradiância solar, temperatura do ar, umidade atmosférica e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998).

Os dados requeridos pela equação FAO Penman-Monteith são obtidos com base em estação meteorológica padrão, podendo esta ser convencional ou automática. Uma estação meteorológica convencional requer um técnico qualificado na utilização dos equipamentos, o qual esteja disponível diariamente. Assim, destacam-se as vantagens do uso de uma estação meteorológica automática, pela facilidade na aquisição e manuseio dos dados e redução dos erros causados por leituras errôneas, além da dispensa de um técnico com disponibilidade integral para a realização das leituras dos equipamentos. A utilização de uma estação meteorológica automática viabiliza o uso do método FAO Penman-Monteith no cálculo da ETo.

Existem diversos modelos de estações meteorológicas automáticas no mercado, porém seu uso é limitado por ser uma tecnologia importada de alto custo de aquisição e manutenção, operacionalidade complexa e pequena disponibilidade de suporte técnico.

Com isso, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma estação meteorológica automática nacional com baixa complexidade na manipulação dos dados, operacionalidade simples, sensores fáceis de serem instalados, para facilitar a manutenção, e que fornecesse resultados confiáveis.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração

A evapotranspiração e a precipitação pluvial são os dois principais parâmetros para estimar a irrigação necessária. Na grande maioria das áreas irrigadas, como regiões áridas e semi-áridas, ou mesmo em regiões úmidas e semi-úmidas quando em período de “veranico”, a quantidade de irrigação necessária é baseada principalmente na evapotranspiração (BERNARDO et al., 2006).

A evapotranspiração é o somatório da evaporação de águas das superfícies com a transpiração das plantas que ocorre na área de cultivo, sendo denominada ETc. Determina-se a evapotranspiração a partir de estimativas ou medições, variando conforme a espécie cultivada, estágio e condições de desenvolvimento da cultura e clima do ambiente (MOREIRA, 2002).

Existem dois grupos de metodologias para se determinar a evapotranspiração das culturas. Os métodos diretos, os quais se baseiam na medição da evapotranspiração em lisímetros ou parcelas experimentais, através do balanço de entrada e saída de água. É uma metodologia simples, porém exige aparatos específicos e medições precisas de vários parâmetros físicos no balanço hídrico do solo. Por outro lado, os métodos indiretos são aqueles que não medem a evapotranspiração diretamente, mas sim, outras variáveis; que servem de entrada em equações para se calcular a evapotranspiração (BERNARDO et al. 2007).

Allen et al. (1998) recomendam que, em vez de medir a evapotranspiração rotineiramente para o gerenciamento de irrigação, seja feita a estimativa dela com base na metodologia FAO-Penman-Monteith (FAO-PM). Tal metodologia requer dados de elementos meteorológicos, sendo principalmente obtidos com o uso de estações meteorológicas para a quantificação correta das variáveis meteorológicas que serão utilizadas na estimativa da evapotranspiração.

A evapotranspiração é um parâmetro relacionado às condições meteorológicas que depende do poder evaporante da atmosfera. Dessa forma, segundo Moura (2007), determinar a evapotranspiração de referência é um passo importante para calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c).

A evapotranspiração de referência é expressa por ET_o, cujo padrão é definido como aquela que ocorre em uma área sem restrições de água, tendo como cultivo de referência uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência de superfície de 70 s/m e albedo de 0,23. É calculada pela metodologia de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

2.2. Meteorologia

A radiação solar é a mais importante fonte de energia do planeta, que pode converter grande quantidade de água líquida em vapor d'água. A quantidade máxima diária de água evaporada depende do local e da época do ano. Porém, ao determinar o efeito da radiação solar sobre a evapotranspiração, deve-se considerar que nem toda a energia disponível é utilizada para evaporar a água, pois parte da energia solar é empregada no aquecimento da atmosfera e do solo (ALLEN et al., 1998).

A radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre é chamada de irradiância solar extraterrestre; 97% dessa radiação está na faixa de 290 a 3.000 nm de comprimento de onda e é chamada de irradiância solar, ou radiação de ondas curtas, ou ainda de irradiância global (R_s). Parte da radiação solar que atravessa a atmosfera chega até a superfície terrestre, enquanto outra parte é difundida e, ou, absorvida por moléculas de gás, partículas de aerossol, gotículas de nuvens e cristais de nuvens na atmosfera (WMO, 2006).

A radiação solar absorvida pela atmosfera, juntamente com a energia emitida pela Terra, eleva a temperatura do ar. Em dia ensolarado e quente, a perda de água evapotranspirada é maior do que em um dia nublado e fresco (ALLEN et al., 1998).

No estudo das variáveis climáticas, a agrometeorologia se ocupa com a temperatura do ar no nível de cultivo. A medida da temperatura do ar é feita em abrigos meteorológicos que têm a função de proteger os instrumentos contra a irradiância solar. Esses abrigos são construídos de forma que o fluxo de ar passe quase que livremente pelos sensores.

O deslocamento de vapor d'água para a atmosfera é causado pela evaporação d'água do solo, rios, oceanos, lagoas, represas e atividade biológica dos seres vivos, entre outros processos. A umidade relativa do ar é estimada pela relação entre a pressão de vapor de água e sua pressão de saturação. Embora a quantidade de vapor d'água na atmosfera se mantenha praticamente constante durante o dia, há oscilações na umidade relativa do ar que estão relacionadas com a variação da temperatura. A umidade relativa do ar varia, atingindo o mínimo de dia e o máximo à noite.

A velocidade do vento é de grande importância na agrometeorologia. A água na superfície evapotranspira e satura o ar da atmosfera que está próximo à superfície evaporante. O vento remove a massa de ar saturada e mistura o ar saturado com o ar seco, aumentando, assim, o poder evaporante da atmosfera (ALLEN et al., 1998).

A velocidade do vento se caracteriza por intensas oscilações na intensidade e na direção. As oscilações ocorrem pela passagem de turbilhões (vórtices ou redemoinhos) de diferentes tamanhos. As oscilações bruscas na velocidade do vento são denominadas rajadas. É comum haver rajadas na superfície terrestre durante o dia. Dessa forma, recomenda-se fazer as observações destinadas a fins climatológicos ou sinóticos de vento na superfície terrestre em intervalos de dez minutos, com valores médios em vez de instantâneos (VAREJÃO-SILVA, 2005).

O anemômetro de concha é um dos instrumentos mais utilizados na agrometeorologia para medir a velocidade do vento. Usam-se rolamentos na construção de um anemômetro para minimizar o atrito, reduzindo assim a inércia, que pode ocasionar erros de medidas nos valores mínimos de resposta do sensor. A medida da velocidade do vento deve ter erro menor que 0,5 m/s para valores de até 5 m/s e de no máximo 10% para valores superiores (WMO, 2006).

A precipitação é caracterizada na meteorologia pela queda d'água da atmosfera para a superfície terrestre, em forma líquida ou sólida. A precipitação é o fenômeno da natureza responsável por devolver a água que evapotranspirou da superfície. A quantificação da chuva é feita por meio dos pluviômetros e pluviógrafos.

2.3. Equipamentos

A quantificação dos fenômenos meteorológicos por meio de estações meteorológicas convencionais requer a atenção de técnicos especializados para o manuseio dos equipamentos de medição. Recomenda-se fazer várias leituras durante o dia para determinar a média diária das variáveis meteorológicas. Segundo Ley et al. (1994), podem-se aumentar os erros nas leituras das variáveis meteorológicas, utilizando estações meteorológicas convencionais por causa do despreparo técnico que ocorre em alguns casos por parte dos usuários dos equipamentos. Dessa forma, na estimativa da evapotranspiração é necessário que se utilize estação meteorológica automática para leituras rotineiras das variáveis meteorológicas.

O uso das estações meteorológicas automáticas tem crescido muito nos últimos anos, por sua maior disponibilidade, pela capacidade de armazenamento de dados e pela facilidade de acesso aos dados medidos. Entretanto, sua utilização ainda é restrita, principalmente em função do seu custo, em torno de R\$10.000,00 (1,00 US\$ = R\$1,58), além dos custos de manutenção e das dificuldades no manuseio e na manutenção.

O maior acesso às estações meteorológicas automáticas permitirá a implantação de programas de gerenciamento de irrigação mais eficientes, reduzindo o consumo de água, energia elétrica, mão-de-obra, menor ocorrência de doenças em plantas e maior eficiência no uso de produtos fitossanitários. Tais fatores proporcionarão maior rentabilidade pela otimização dos insumos e, sobretudo, pelo aumento da produtividade, juntamente com a preservação ambiental.

Um sistema eletrônico de aquisição de dados para a mensuração automática de dados meteorológicos tem, principalmente, os objetivos de facilitar as leituras das variáveis meteorológicas e evitar erros de leituras dos equipamentos de medição dessas

variáveis. O registro automático dos dados das variáveis meteorológicas facilita o uso dos instrumentos de medições dessas variáveis por permitir que o usuário não tenha de fazer leituras rotineiras, pelo fato de os instrumentos mensurarem e registrarem automaticamente os dados. Dessa forma, é de grande importância o uso de sistema de aquisição de dados interligado a sensores específicos para realizar a leitura das variáveis meteorológicas do ambiente em que se encontra.

2.4. Metrologia

É comum determinar algumas variáveis e grandezas físicas com o uso de artifícios próprios de uma pessoa. Por exemplo, pode-se verificar se uma pessoa está com febre, encostando-lhe as mãos; calcular a distância de uma barreira num jogo de futebol, contando-se 11 passos da bola; e se um dia está ensolarado o suficiente para um passeio no clube. No entanto, não se pode mensurar com certeza uma grandeza física com base em sentidos humanos.

Instrumentos de medida servem, portanto, como extensão das faculdades humanas, e seu uso pode ser simples. Com o avanço tecnológico, os instrumentos de medidas têm se tornado cada vez mais exatos, simples no manuseio e com várias possibilidades de utilização que facilitam seu uso.

Segundo Lira (2007), o operador deve conhecer vários requisitos que envolvem o processo de medição, como os termos empregados em metrologia, necessários para interpretação de especificações e resultados. Segue algumas definições importantes para esse trabalho.

- Erro (de medição): Resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando.
- Escala linear: Escala na qual cada comprimento de uma divisão está relacionado com o valor de uma divisão correspondente por um coeficiente de proporcionalidade constante ao longo da escala.
- Exatidão de um instrumento: Aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro.

- Faixa de medição: Conjunto de valores de um mensurando para o qual se admite que o erro de um instrumento de medição se mantém dentro dos limites especificados.
- Instrumento analógico: Instrumento de medição no qual o sinal de saída ou a indicação é uma função contínua do mensurando ou do sinal de entrada.
- Instrumento digital: Instrumento de medição que fornece um sinal de saída ou uma indicação de forma digital.
- Mensurando: Objeto de medição. Grandeza específica submetida à medição.
- Repetitividade (de resultados de medições): grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição.
- Resolução (de um dispositivo): Menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida.
- Sensibilidade: Variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.
- Sensor: Elemento de um instrumento de medição ou de uma cadeia de medição que é diretamente afetado pelo mensurando.
- Tempo de resposta: Intervalo entre o instante em que um estímulo é submetido a uma variação brusca e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável.
- Transdutor de medição: Dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação determinada com a grandeza de entrada.

Segundo Lira (2007), o termo “precisão” não é mais utilizado em metrologia. Quando utilizar um instrumento nas mesmas condições, ou seja, com o mesmo operador, mesmo processo de medição, no mesmo local e com um pequeno intervalo de tempo entre a tomada das medições, então as características de dispersão das indicações em termos quantitativos podem ser expressas pela repetitividade, e não por precisão.

2.5. Eletrônica

Uma estação meteorológica automática é um sistema autônomo de mensuração e registro dos dados de fenômenos meteorológicos. Conforme mencionado, os sensores usados para calcular a evapotranspiração com base na metodologia FAO são: anemômetro, higrômetro, piranômetro e termômetro.

Os dados provenientes de sensores são a base para o monitoramento e o controle da maioria dos processos industriais (HALLIDAY et al., 1996; SEDRA; SMITH, 2000). Thomazini e Albuquerque (2007) definem sensor como um dispositivo sensível a alguma forma de energia, relacionando-a com uma grandeza física.

As grandezas físicas (irradiância solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar, entre outras) registradas em sistemas de aquisição de dados são inerentes a alguns fenômenos físicos, e, em geral, sua natureza é analógica. Tocci e Widmer (2000) afirmam que uma variável analógica assume valores contínuos e reais, diferentemente dos sinais digitais, que são descontínuos e expressos em uma representação binária. As grandezas analógicas podem ser obtidas por meio de sensores eletrônicos.

Um sensor eletrônico (estado sólido) é um dispositivo que cria um campo elétrico, induz uma tensão ou uma corrente e reage a qualquer alteração desse campo elétrico (ORDONEZ et al., 2005).

Geralmente, os sensores analógicos não possuem características elétricas compatíveis com o sistema de aquisição de dados, sendo necessário condicionar o sinal do sensor antes de efetuar a leitura. O condicionamento dos sinais na eletrônica é feito com circuitos denominados condicionadores de sinais. Esse tipo de circuito ajusta o sinal recebido do sensor para a faixa de medição que o sistema de aquisição de dados está preparado para efetuar a mensuração.

Um dos condicionadores de sinais mais comuns, de acordo com Boylestad e Nashelsky (1998), é o multiplicador de ganho constante, também conhecido como amplificador não inversor. A exatidão do seu ganho (amplificação) depende da tolerância dos resistores que forem acoplados ao circuito. Ou seja, se a tolerância dos resistores for pequena, a exatidão do circuito será grande, sendo inversamente proporcional. Esse circuito é basicamente composto por um amplificador operacional e dois resistores.

Outro circuito importante para esse trabalho é o condicionador de sinais denominado fonte controlada. Útil em vários dispositivos de instrumentação, o condicionador de sinais “fonte controlada” tem quatro configurações básicas, sendo elas: fonte de tensão controlada a tensão, fonte de corrente controlada a tensão, fonte de tensão controlada a corrente e fonte de corrente controlada a corrente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1998). A tensão de saída de um condicionador de sinais do tipo fonte de tensão controlada a corrente depende da corrente de entrada. Seu circuito utiliza um amplificador operacional, um resistor e dois capacitores.

Depois de passar pelo condicionador de sinais, o sinal do sensor analógico é enviado para um conversor A/D. A conversão do sinal analógico é realizada por um dispositivo denominado conversor analógico-digital. Esse dispositivo produz um sinal digital que representa um sinal analógico. Uma das principais características de um conversor A/D é a resolução do sinal de saída. A resolução de um conversor A/D é definida por Tocci e Widmer (2000) como a menor tensão analógica necessária para proporcionar uma mudança na saída do conversor. A quantidade de valores que um conversor A/D representa em sua saída é igual a 2^n , sendo n o número de bits que o conversor possui. Dessa forma, um conversor A/D com resolução de 10 bits converte uma tensão analógica, fazendo que a menor tensão que o conversor representa seja mostrada como zero e a maior, $1023 (2^{10} - 1)$.

Para converter um sinal analógico, este não pode oscilar durante o tempo em que está sendo convertido. Para isso é utilizado um circuito de amostragem e retenção, mais conhecido por *sample-and-hold* (S/H). O S/H mantém a tensão analógica constante enquanto a conversão A/D é realizada. Um circuito S/H tem alta impedância de entrada; dessa forma, o circuito não drena corrente excessiva do sensor nem do condicionador de sinais, realizando uma leitura do sinal analógico sem alterá-lo.

Além dos sensores analógicos, outro sensor muito utilizado para quantificar variáveis meteorológicas é o digital. Tal sensor é calibrado para gerar sinais elétricos (eventos) quando ocorrer um acúmulo de energia suficientemente grande para realizar uma ação mecânica; como o virar de uma báscula, o giro do eixo de um anemômetro etc.

Os sensores apenas efetuam as leituras das variáveis meteorológicas, disponibilizando-as para o sistema automático de aquisição de dados, que condiciona e converte os sinais analógicos em digitais, registrando em seguida os dados em memória,

para disponibilizá-los futuramente. O automatismo no registro dos dados cada vez mais é tendencioso para que seja realizado por equipamentos eletrônicos, sendo esses em sua grande maioria realizados por microcontroladores.

Microcontroladores são circuitos integrados de simples utilização, com vários tipos de encapsulamentos e destinados ao tratamento de sinais digitais (PEREIRA, 2002). Internamente são compostos por memória RAM (memória de acesso aleatório) e ROM (memória somente de leitura), oscilador de clock, I/O (portas de comunicação), barramentos, temporizadores, conversores de sinais, entre outros. Segundo Oliveira e Andrade (2006), a grande quantidade de periféricos inseridos em um único circuito integrado proporciona a redução do circuito eletrônico dos dispositivos eletrônicos, reduzindo, dessa forma, custos e tempo de projeto e tornando-os componentes indispensáveis em novas aplicações.

Alguns dispositivos eletrônicos necessitam de memória externa, por causa da quantidade de dados que o equipamento gera, sendo que esses não podem se perder caso haja falha no fornecimento de energia. O armazenamento de dados em memória não volátil de forma rápida e prática pode ser efetuado por meio de uma memória do tipo EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory). Segundo Tocci e Widmer (2000), uma memória EEPROM pode registrar ou apagar dados da memória apenas eletricamente, o que facilita, e muito, o desenvolvimento de um novo projeto. Existem vários tipos de protocolos de comunicação para memórias, entre eles: I²C, SPI, 1-WIRE, CAN e paralelo, entre outros.

Os circuitos integrados em uma placa de dispositivo comunicam-se por meio de protocolos, sendo I²C (Inter Integrated Communication) um dos mais utilizados. I²C é um protocolo síncrono que possibilita a comunicação de diversos dispositivos com uma só conexão provida por duas vias (clock - SCL e dados - SDA), sendo realizada por saídas em coletor aberto (open collector), constituindo, assim, um barramento de comunicação serial, ou uma rede de dispositivos (PEREIRA, 2003; ZANCO, 2006).

A quantidade de dispositivos no barramento I²C é limitada pela capacitância máxima de 400 pF, sendo essa determinada pela quantidade de dispositivos conectados no barramento. Para que dois ou mais dispositivos no barramento I²C não entrem em conflito, cada componente ligado ao barramento deve possuir um endereço diferente, sendo esse mestre ou escravo do barramento. Pode-se configurar o dispositivo mestre para que o endereçamento seja feito com sete ou dez bits. A comunicação no protocolo

I²C ocorre inicialmente com uma solicitação de um dispositivo mestre; em seguida, o dispositivo escravo responde ao mestre conforme solicitado (PEREIRA, 2003).

A aquisição de dados é realizada ao descarregar os dados de um equipamento em um microcomputador. Tal procedimento ocorre por meio de cabos com auxílio de protocolos específicos, sendo geralmente utilizados os protocolos: paralelo (LPT) e serial (RS-232, USB). Segundo Zelenovsky e Mendonça (2002), a porta serial contrasta com a porta paralela em dois pontos básicos. A porta paralela comunica mais rapidamente do que a porta serial (RS 232), fato esse provido pelos 18 condutores da porta paralela. A porta serial requer apenas três condutores para realizar uma comunicação bidirecional, ocasionando, assim, uma comunicação com velocidade mais limitada do que a provida pela paralela, mas por outro lado aperfeiçoa as conexões entre um sistema de aquisição de dados e um microcomputador.

Maior quantidade de condutores leva os equipamentos a terem custo elevado, proporcionado por maior quantidade de conexões a serem realizadas. Dessa forma, opta-se por uma comunicação serial ao se desenvolver um equipamento que não tenha grande necessidade de grande velocidade de comunicação. As portas seriais (RS-232) do PC são programáveis com comunicação assíncrona. Configura-se a velocidade de transmissão (*baud-rate*), bits de paridade, bits de parada, quantidade de caracteres.

Grande parte dos equipamentos que mostram dados ao usuário o faz por meio de um display, sendo este, na maioria das vezes, um display de cristal líquido (LCD). Um dos motivos que leva um projetista a utilizar um LCD é o seu baixo consumo. Comparativamente com um display de LED, segundo Boylestad e Nashelsky (1998), um LCD tem consumo na ordem de microwatts, enquanto o consumo para um display de LED está na faixa de miliwatts. Entretanto, um LCD necessita de uma fonte de luz externa ou interna, para que seu funcionamento seja adequado.

LCDs de caracteres normalmente são compatíveis com o código ASCII e mostram letras, números e caracteres especiais. Além dos caracteres armazenados na memória RAM interna do LCD, o mesmo permite que se criem novos caracteres ou símbolos personalizados. Existem vários tipos de LCDs caracteres como exemplo: 8x1, 8x2, 16x1, 16x2, 16x4, 20x2 e 20x4, entre outros. De acordo com Zanco (2006), equipamentos que serão utilizados no campo devem ser construídos com LCDs do tipo reflexivo, por terem melhor desempenho.

Para o bom funcionamento de um equipamento, cria-se uma placa de circuito impresso (PCI) que liga os componentes elétricos e eletrônicos de forma permanente e eficiente. A PCI contribui na redução de mau contato entre os elementos constituintes da placa, além de facilitar a montagem e produção de equipamentos, reduzindo-se e até substituindo a utilização de fios por trilhas de cobre (OLIVEIRA; ANDRADE, 2006).

2.6. Comparação dos dados

Segundo Moore e McCabe (2002), a melhor maneira de se verificar a relação entre duas variáveis é por meio de um diagrama de dispersão, usando variáveis quantitativas dos tipos dependente e independente. Em um diagrama de dispersão, representa-se a variável independente no eixo horizontal e a variável dependente no eixo vertical. Verifica-se o padrão geral de um diagrama de dispersão por meio da forma, direção e intensidade da relação. No entanto, um diagrama de dispersão não quantifica a relação entre as variáveis.

Algumas das ferramentas estatísticas utilizadas para mensurar a relação que há entre as variáveis são: coeficiente de correlação (r), erro de viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). A correlação quantifica direção e intensidade da relação entre as variáveis do diagrama de dispersão. O MBE quantifica, na própria unidade da variável medida, a superestimação ou subestimação do modelo. O RMSE quantifica a dispersão dos dados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa de desenvolvimento da Estação Meteorológica Automática (EMA) foi dividida em três etapas: desenvolvimento, calibração e comparação dos dados.

Realizou-se o referido desenvolvimento no Laboratório de Automação e Irrigação de Precisão do DEA/UFV (Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV) e no laboratório da empresa IRRIPLUS (Iriplus Equipamentos Científicos Ltda.), pertencente à Incubadora de Empresas de Base Tecnológica da UFV.

A calibração dos sensores foi realizada no laboratório da IRRIPLUS e, em campo, no DEA/UFV.

A comparação dos dados foi realizada na área pertencente à UFV, onde está instalada a EMA do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), com longitude de 42° 52' Oeste, latitude de 20° 45' Sul e altitude de 712 m.

3.1. Desenvolvimento da estação meteorológica automática

A estação meteorológica automática (EMA) foi desenvolvida para ser eletronicamente automatizada na leitura e no registro dos dados das variáveis meteorológicas. A capacidade de armazenamento dos dados na memória do equipamento é de um ano, com disponibilidade de dados diários no *display* e dados

horários mediante a retirada da base de dados por meio de uma conexão acessível para microcomputador. A energia elétrica utilizada para o sistema é gerada por meio de um painel solar, que por sua vez carrega uma bateria para suprir a deficiência energética nos períodos noturnos.

Para dar início ao projeto, idealizou-se o sistema em um diagrama de blocos, forma essa que ordena melhor as idéias de construção de um dispositivo. O diagrama de blocos da EMA foi dividido em oito partes, conforme mostrado na Figura 2.

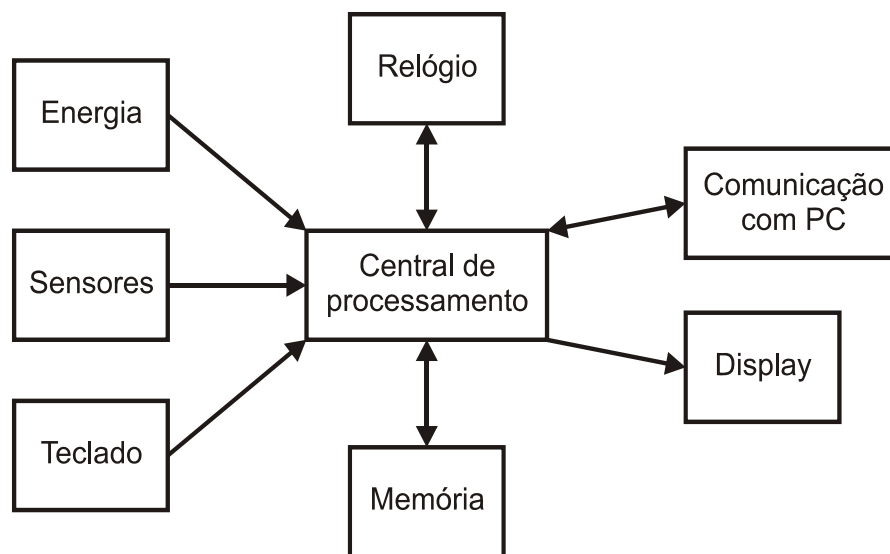


Figura 2 – Diagrama simplificado da EMA proposta.

O principal bloco do sistema foi nomeado “Central de Processamento”. Tal bloco gerencia todas as funções do equipamento, unindo entradas e saídas do sistema. Os blocos secundários são os de entrada e saída expostos nas extremidades do diagrama.

Os blocos de entrada “Energia”, “Sensores” e “Teclado” podem ser identificados pelo sentido das setas de indicação, ressaltando-se que as setas no caso dos blocos citados entram no bloco central. O bloco “Energia” é o que promove a auto-suficiência energética do sistema, por meio de um painel solar. O bloco “Sensores” é responsável por envio dos sinais elétricos que representam os fenômenos meteorológicos. O bloco “Teclado” envia para a Central de Processamento as operações desejadas do usuário.

Os blocos de entrada e saída “Relógio”, “Memória” e “Comunicação com PC” são aqueles com setas em ambos os sentidos. “Relógio” é o bloco responsável por informar à Central de Processamento o momento exato de executar as operações.

“Memória” é o bloco que armazena os dados, sendo este também a fonte de fornecimento dos dados históricos do equipamento. “Comunicação com PC” é um bloco de controle que é utilizado para fazer leitura dos dados históricos e configurar o equipamento de forma geral.

O bloco de saída *Display* é caracterizado pela seta que está em sentido contrário à Central de Processamento. O bloco *Display* apresenta os dados históricos ou correntes solicitados pelo usuário.

Após uma explicação geral do diagrama, torna-se necessário maior detalhamento do diagrama que será feito na criação dos esquemas elétricos.

O bloco “Energia” é o que dá condição para o circuito funcionar. A EMA desenvolvida é um dispositivo eletrônico e, como tal, requer energia elétrica para seu funcionamento. A energia elétrica utilizada no equipamento é fornecida por um painel solar de 5 W. Após a captação dos raios solares, o painel converte a energia solar em energia elétrica e a envia para um circuito condicionador de sinal (Figura 3), que reduz o sinal de 16 para 6,6 V.

Após a conversão de tensão, o circuito condicionador de sinais fornece energia para carregar a bateria de 6,6 V com 4 AH. A bateria acumula a energia elétrica para liberar aos poucos durante o período em que o painel solar não estiver exposto à radiação solar. Dessa forma, o circuito estará em pleno funcionamento durante todo o tempo.

Para obter maior aproveitamento da energia solar, deve-se instalar o painel solar com uma inclinação igual à latitude onde o mesmo está instalado. Porém, fixou-se o painel solar com uma inclinação de 30°, seguindo a recomendação do fabricante para uma instalação cuja inclinação seja fixa.

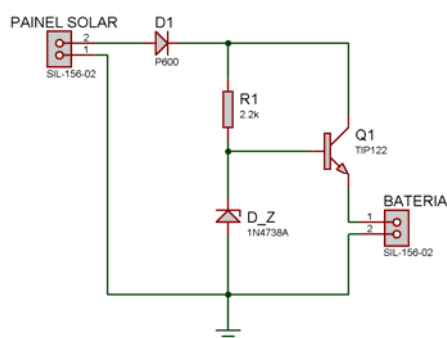


Figura 3 – Circuito condicionador de sinais do painel solar.

A bateria, depois de carregada, apresenta diferença de potencial em torno de 6,6 V, energia essa que necessita ser novamente convertida para alimentar o circuito, tendo em vista que este requer alimentação na faixa de 4 a 5 V. Dessa forma, a bateria envia sua energia a um segundo condicionador de sinal (Figura 4), que reduz a tensão de 6,6 V para uma tensão em torno de 4,5 V.

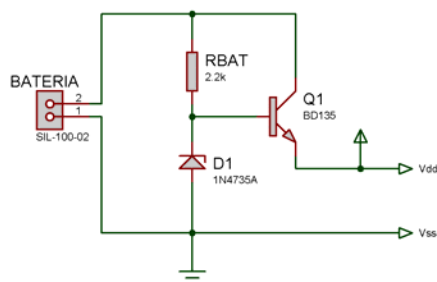


Figura 4 – Circuito condicionador de sinal da bateria.

O bloco “Sensores” é responsável por receber e mensurar os fenômenos meteorológicos. Depois de mensurado, tal bloco envia o sinal elétrico para a Central de Processamento. A EMA possui dois tipos de sensores: analógicos e digitais. O higrômetro, piranômetro e termômetro são sensores analógicos, ao passo que o anemômetro e o pluviômetro são sensores digitais.

O sensor de temperatura utilizado neste trabalho trata-se de um componente eletrônico comercial LM35CAZ da “National Semiconductor”, que é um circuito integrado com encapsulamento plástico TO-92. O sinal de saída do LM35CAZ é uma tensão proporcionalmente linear à temperatura em °C, sendo seu sinal igual a +10,0 mV/°C. O sensor tem as seguintes características: tensão de alimentação de 4 a 30 V, exatidão de $\pm 0,5$ °C e faixa de medição de -55 °C a 150 °C. O circuito condicionador de sinal utilizado pra ampliar a faixa de tensão do sensor está exposto na Figura 5.

O higrômetro utilizado foi o componente eletrônico HHH-4000-004, da Honeywell, com encapsulamento SIP. Tal componente é composto de um elemento sensor capacitivo de polímero com um condicionador de sinal integrado. Esse componente requer alimentação externa para seu funcionamento, sendo adotada a tensão de referência 4,096 V neste trabalho; tensão essa ajustada pelo regulador de tensão MCP1541 da Microchip. Tal sensor já possui uma calibração de fábrica com grande exatidão em sua resposta, sendo garantido pelo fabricante um erro de no máximo

$\pm 3,5\%$. O fabricante recomenda utilizar um filtro no sinal de saída para estabilizar a resposta (Figura 5). As equações indicadas pelo fabricante são:

$$RH_{25^{\circ}C} = \frac{\left(\frac{V_{Out}}{V_{Supply}} - 0,16 \right)}{0,0062} \quad (1)$$

$$TrueRH = \frac{RH_{25^{\circ}C}}{1,0546 - 0,00216T} \quad (2)$$

em que:

$RH_{25^{\circ}C}$: umidade relativa do ar a uma temperatura igual a $25^{\circ}C$ (%);

V_{Out} : resposta do sensor de umidade relativa do ar (V);

V_{Supply} : tensão de alimentação do sensor de umidade relativa do ar (V);

TrueRH: umidade relativa do ar com a correção de temperatura (%); e

T: temperatura ambiente em que o sensor está exposto ($^{\circ}C$).

Por meio da equação 1 ($RH_{25^{\circ}C}$) se determina o percentual de umidade relativa do ar para uma temperatura ambiente igual a $25^{\circ}C$. Caso a temperatura ambiente seja diferente de $25^{\circ}C$, utiliza-se também a equação 2 para corrigir o percentual de umidade relativa com relação à temperatura atual. A conexão que envia o sinal para a Central de Processamento pode ser visualizada na Figura 5, sendo simbolizada por UR. O sensor tem as seguintes características: tensão de alimentação de 4 a 5,8 V; exatidão de $\pm 3,5\%$; faixa de temperatura-limite em operação de $-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$; e faixa de medição do componente de 0 a 100% de umidade relativa do ar.

A ação de intempéries sobre os sensores de temperatura e umidade relativa do ar pode ocasionar leituras duvidosas. Dessa forma, para que não haja formação de um microclima próximo aos sensores diferente do real, desenvolveu-se um abrigo termométrico (Figura 6), que faz com que o microclima próximo dos sensores seja o mais próximo possível do clima atmosférico. O material utilizado na construção do abrigo foi o polipropileno, na cor branca para refletir a maior quantidade possível de energia solar.

Para proteção, colocou-se um cilindro de PVC em torno dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar, a fim de evitar maior incidência de radiação sobre o sensor, além da proteção mecânica que este proporciona.

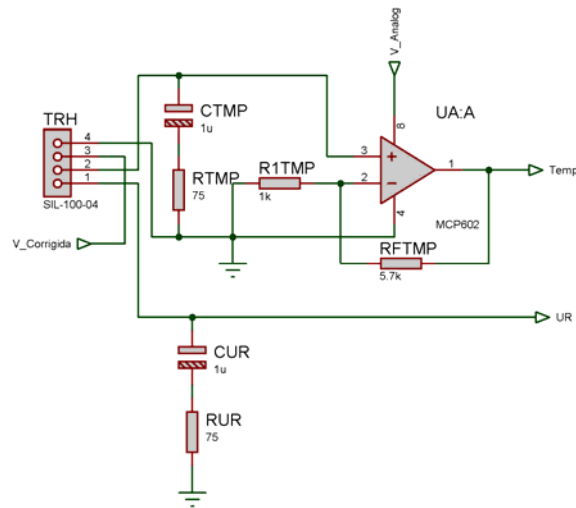


Figura 5 – Circuito de alimentação e filtro do higrômetro, juntamente com circuito condicionador de sinais do sensor de temperatura.



Figura 6 – Abrigo termométrico desenvolvido no experimento.

O princípio de medição do piranômetro escolhido para este trabalho tem como base um componente eletrônico semiconductor chamado de fotodiodo. O fotodiodo é um sensor fotoelétrico de silício que converte a energia da irradiância solar em tensão elétrica. O elemento sensor utilizado neste trabalho foi o BPW20R, da Vishay

Semiconductors, que é um fotodiodo de silício plano, especialmente desenvolvido para aplicações de alta precisão linear. O encapsulamento do BPW20R é o TO-5. Esse componente é frágil, dessa forma desenvolveu-se um invólucro torneado em polipropileno para proteção do elemento sensor, que pode ser visualizado na Figura 7. O invólucro deverá transmitir a irradiância solar na faixa de 400 a 1.100 nm do comprimento de onda, faixa essa em que o fotodiodo é sensível. Depois de inserido o componente no invólucro, completa-se o furo com cola quente para fixar e proteger o sensor. O sinal elétrico deste passa por um condicionador de sinal que o converte de corrente para tensão e depois o envia para a Central de Processamento.



Figura 7 – Piranômetro desenvolvido no experimento.

O anemômetro de concha (Figura 8) é um sensor que mede a velocidade do vento somente no plano horizontal. Sua estrutura e o funcionamento se dão da seguinte forma: um cilindro torneado com um furo no centro é a base do anemômetro. Por dentro do cilindro passa-se um eixo que sustenta as conchas. Foram colocadas três conchas em um suporte, sendo igualmente espaçadas entre si num ângulo de 120°. O eixo foi fixado em dois rolamentos com o objetivo de propiciar maior sensibilidade ao sensor.

A parede da base do cilindro é mais espessa para fixar o sensor magnético (*reed switch*). Fixou-se um ímã permanente no eixo do anemômetro, de forma que, ao girar o eixo, o ímã passa próximo ao *reed switch*, fazendo com que o circuito de polarização do tipo *pull-up* (Figura 9) transforme o sinal de cinco para zero volt. Uma revolução é equivalente a uma volta completa (360°) das conchas do anemômetro. Cada revolução das conchas do anemômetro gera um pulso elétrico para o contador na Central de Processamento. Utilizou-se o *reed switch* como elemento sensor para reduzir o consumo de energia elétrica da EMA, tendo por base que a chave magnética em série com o resistor de $1\text{ M}\Omega$ consome cerca de $5\ \mu\text{A}$.

Tal processo, conectado à Central de Processamento, conta o número de pulsos ao girar o eixo do anemômetro. O total de pulsos emitidos em determinado intervalo de tempo é proporcional à velocidade do vento.



Figura 8 – Anemômetro desenvolvido no experimento.

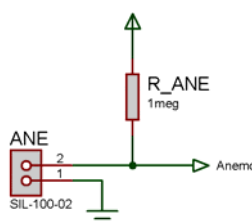


Figura 9 – Circuito de polarização do tipo *pull-up*, do anemômetro.

Varejão-Silva (2005) recomenda que pluviômetros sejam constituídos de aço inox para reduzir o efeito da oxidação e as perdas de evaporação. O pluviômetro (Figura 10) consiste de um coletor de chuva com um cilindro externo de aço inox AISI 430 que sustenta todo o equipamento. A base do cilindro é de alumínio e tem a função de suportar o sensor de acrílico (báscula), além de fechar o sistema pelo lado inferior. Acima do cilindro foi colocado um funil de alumínio que coleta água da chuva e a concentra na báscula.



Figura 10 – Pluviômetro desenvolvido no experimento com detalhe na báscula.

A base do sensor é composta por quatro partes: base, báscula e dois parafusos de calibração. Os parafusos são fixados na base da báscula, de forma que servem para estabelecer o volume de água necessário para fazer com que a báscula entorne o volume calibrado (11,5 ml). A báscula, que possui uma divisória formando dois recipientes de coleta de água, é fixada na base de alumínio, ficando pendida para um dos lados.

O funcionamento da báscula é similar ao de uma balança com pêndulo. Ao atingir o volume de água preestabelecido na calibração, a báscula entorna a água fazendo com que um ímã permanente fixado no coletor passe sobre o sensor magnético (*reed switch*), que, por sua vez, é conectado à Central de Processamento. O pluviômetro

não é ligado a um circuito condicionador de sinal externo pelo fato de o pino em que ele for conectado na Central de Processamento já possuir um condicionador de sinal do tipo *pull-up* internamente, que funcionará como um contador de pulsos. Cada pulso é equivalente a uma parcela de precipitação, sendo de 1/3 de milímetro a parcela escolhida para este trabalho. Escolheu-se a resolução de 0,33 mm pela facilidade na conversão dos dados digitais em dados de precipitação, de forma que, com o acúmulo de cada três pulsos do pluviômetro, se tenha 1 mm de precipitação.

O bloco “Teclado” é formado por quatro botões modelos 18531-GFDSTSE e 18531-GEDSTSE, da Mar-Girius Continental Indústria de Controles Elétricos Ltda. Os botões são ligados diretamente na Central de Processamento, porque os pinos em que os botões serão ligados já possuem condicionadores de sinais do tipo *pull-up* para cada botão. Não foi instalado nenhum filtro de ruídos eletronicamente porque se instalaram filtros contra ruídos no programa.

Equipamentos que precisam executar tarefas com horários preestabelecidos necessitam ter, de alguma forma, um relógio integrado a seu sistema. A EMA foi projetada para medir e armazenar na RAM (Random Access Memory – memória volátil) as variáveis meteorológicas de minuto em minuto, ressaltando-se que, de hora em hora, a Central de Processamento calcula a média com os valores armazenados, estabelece o posicionamento e armazena os dados da hora corrente no bloco “Memória”; logo em seguida libera a memória RAM para uma nova armazenagem de dados. O bloco “Relógio” é composto por um cristal de quartzo de 32.768 Hz e um circuito integrado denominado DS1337 da Maxim/Dallas Semiconductor. O DS1337 é um RTC (Real-Time Clock) com comunicação serial via protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit).

Para melhor praticidade do usuário, a EMA foi projetada com memória suficiente para registrar dados num prazo de um ano, e, após esse período, os novos dados começarão a sobrescrever os dados antigos sem nenhuma mensagem. Dessa forma, recomenda-se que se realize a aquisição dos dados no mínimo dentro de um ano. A Central de Processamento sempre envia comando para registro dos dados para a memória quando ocorre a virada da hora corrente. Ao virar da hora corrente, a Central de Processamento calcula a média das leituras feitas durante toda a hora e a armazena na posição da memória, determinada com base na data e na hora corrente.

O bloco “Memória” é composto por uma memória do tipo EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory), modelo 24LC1025-I/P, da Microchip Technology Inc. Esse componente tem como características principais: leitura e escrita por comunicação serial via protocolo I2C, capacidade de armazenamento de 1.024 kB, faixa de tensão de trabalho de 2,5 V a 5,5 V e armazenagem dos dados por um tempo maior do que 200 anos quando o componente estiver sem energia.

No bloco “Comunicação com o PC”, efetua-se a aquisição de dados, que é feita de forma semi-automática, com o auxílio de um microcomputador. O protocolo de comunicação entre a EMA e o microcomputador é o RS-232. A conexão física entre a EMA e o microcomputador deve ser feita por um cabo especificamente desenvolvido para tal finalidade ou, então, utilizando-se um conversor Serial TTL/USB. Por meio da aquisição dos dados feita com o auxílio de um microcomputador, podem-se visualizar não somente os dados diários, como também os dados horários.

O bloco *Display* é composto por um LCD (*Display* de Cristal Líquido). A EMA foi projetada para mostrar no visor somente os dados diários, os quais são visualizados um de cada vez, ou seja, variável por variável e dia a dia. O usuário determina, por meio do teclado, quais dados deseja visualizar; escolhendo a variável e a data desejadas.

O bloco Central de Processamento possui os seguintes componentes: um microcontrolador PIC16F877A-I/P, da Microchip Technology Inc.; dois capacitores cerâmicos de 22 pF; e um cristal de quartzo de 4 MHz. O componente eletrônico que gerencia todas as operações na EMA é o microcontrolador PIC16F877A-I/P, que possui uma memória de 14,3 kbytes com a função de armazenar o programa que determina as operações a serem realizadas na EMA. O programa foi criado em um microcomputador com programa em linguagem C.

Para o funcionamento completo da EMA é necessário unir todos os blocos em um só sistema. Dessa forma, criou-se o esquema elétrico completo (Figura 11) do equipamento, bem como a sua simulação.

Depois de criado e simulado o esquema elétrico da EMA, montou-se o circuito (Figura 12) no protoboard MP-2420, da Minipa, para verificar o funcionamento do esquema elétrico na prática. Depois de montado o circuito eletrônico, gravou-se o PIC16F877A no gravador de memória ICD2BR, da Labtools Mosaico Didactic Division, por meio do programa Mplab IDE versão 7.6, da Microchip Technology Inc.

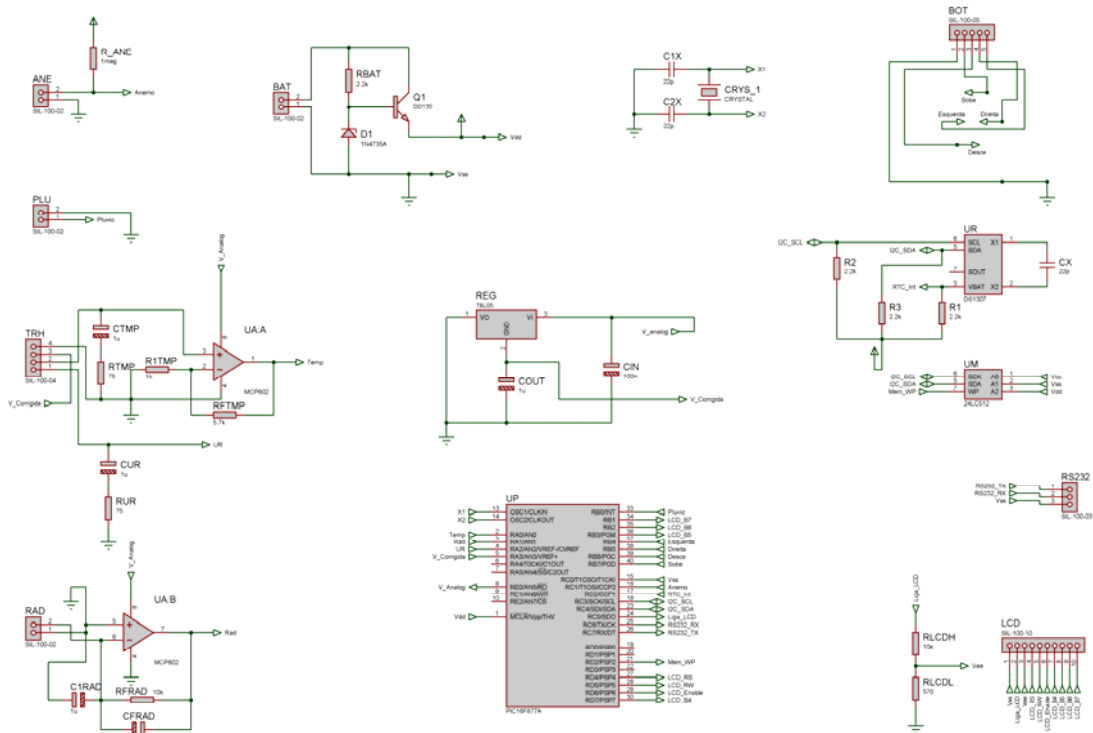


Figura 11 – Esquema elétrico completo da EMA.

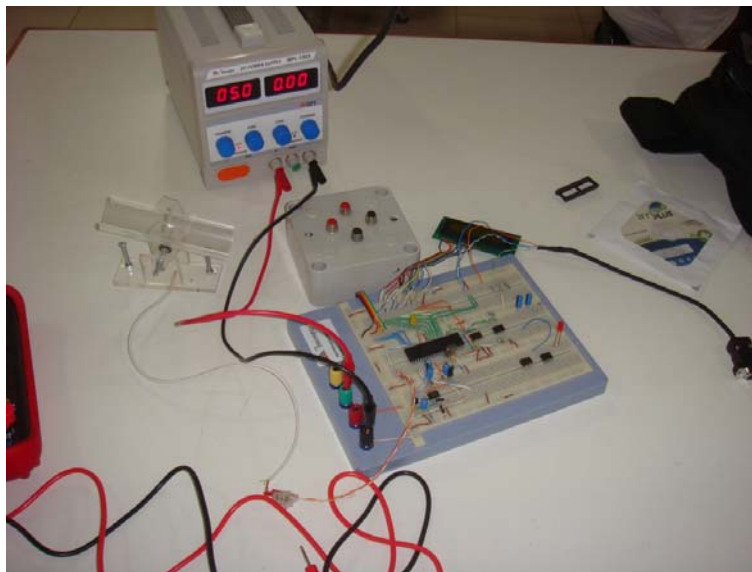


Figura 12 – Circuito eletrônico da EMA montado no protoboard MP-2420.

Verificado o pleno funcionamento do circuito eletrônico no protoboard, viu-se a necessidade de desenvolver uma placa de circuito impresso (PCI) para que a EMA tivesse autonomia de funcionamento, tornando-se de fato um equipamento. Dessa forma, criou-se o *layout* da PCI com base no esquema elétrico da figura 11.

placa, soltando-se, assim, o *toner* na placa de cobre. Após a transferência do *toner* para a placa de cobre, esta foi colocada em bandeja com solução de água com perclorato de ferro para efetuar a corrosão do cobre. Deixou-se a placa mergulhada na solução até se observar que todo o cobre desnecessário tinha sido retirado. Logo após, retirou-se o *toner* que ficou fixado na placa com água, detergente e lã de aço. Para finalizar, foi feita a furação da placa com furador de placas. Com a PCI pronta, efetuou-se a soldagem dos componentes, resultando na placa da Figura 14.

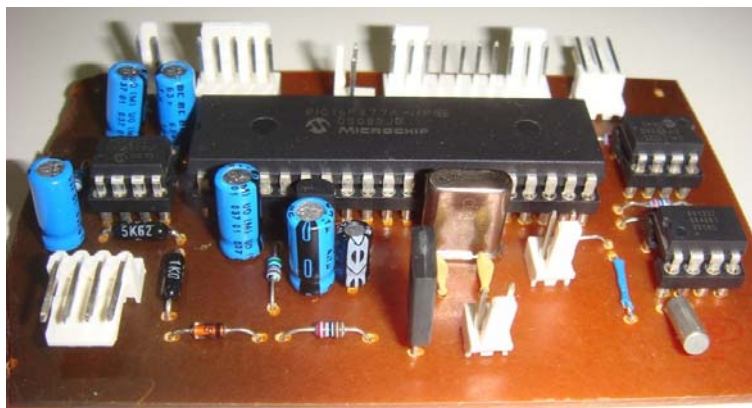


Figura 14 – Placa de circuito impresso da EMA com os componentes eletrônicos soldados.

A montagem da caixa eletrônica (Figura 15) da EMA foi realizada observando-se os preceitos básicos de que em um circuito eletrônico não se deve ter umidade; dessa forma, realizou-se a vedação de todos os orifícios do invólucro com cola quente. Para reduzir custos na manutenção do equipamento e facilitá-la, priorizou-se a inserção de conectores que propiciassem a conexão dos sensores ao equipamento.

A EMA é um equipamento que mede e registra dados dos fenômenos meteorológicos, sendo necessário instalá-la em campo exposto à chuva, vento, irradiância solar, entre outros fenômenos da natureza. Dessa forma, o equipamento foi constituído todo de aço inox, alumínio, polipropileno, acrílico, PVC e outros materiais também resistentes à oxidação causada por intempéries.



Figura 15 – Caixa eletrônica da EMA montada.

A aplicação foco da EMA neste projeto está na agricultura; dessa forma, segundo WMO (2006), devem-se instalar os sensores na estrutura da EMA seguindo um posicionamento de 1,5 m de altura para o higrômetro, piranômetro, pluviômetro e termômetro e de 2 m de altura para o anemômetro, conforme se pode observar na Figura 16. Tal posicionamento é o que melhor representa o ambiente das plantas na agricultura.



Figura 16 – EMA desenvolvida com destaque para o posicionamento dos sensores.

Além de medir corretamente os fenômenos meteorológicos, os sensores devem ser instalados na EMA, de forma que não haja interferência nas leituras das variáveis meteorológicas por meio de objetos que possam obstruir as leituras dos sensores.

O piranômetro foi, assim, instalado no topo do equipamento, de forma que os raios solares atingissem o sensor em todo o tempo em que o Sol estivesse sendo visto na atmosfera. O único sensor da EMA instalado com altura maior que a do piranômetro é o anemômetro. Este está a uma distância de meio metro do piranômetro, com um ângulo de 45°. Com isso, a instalação da EMA no campo deve ser realizada de modo que o anemômetro esteja voltado para o norte, para que o piranômetro seja atingido pelos raios solares de leste a oeste no deslocamento do Sol durante o dia.

Para melhor visibilidade dos dados no *display* do equipamento, adotou-se uma inclinação de 30° com o solo para o registrador de dados, facilitando o uso do equipamento pelo usuário.

Em seguida, foi criado um programa (E3000AD – Figura 17) para realizar a aquisição dos dados registrados na EMA, salvando-os em arquivo de banco de dados com extensão “mdb”. Podem-se cadastrar vários equipamentos em um só E3000AD. O usuário seleciona o banco de dados do equipamento a ser usado ou solicita ao programa que o identifique, após ter conectado o microcomputador no equipamento.



Figura 17 – Tela inicial do programa E3000AD.

Na configuração (Figura 18) do programa, efetuam-se cadastro, alteração ou exclusão de equipamentos, sendo possível registrar altitude, latitude e observações extras para facilitar na identificação do equipamento. Por meio da tela configuração, pode-se também atualizar data e hora do equipamento ou verificar se ele está com data e hora atualizadas.

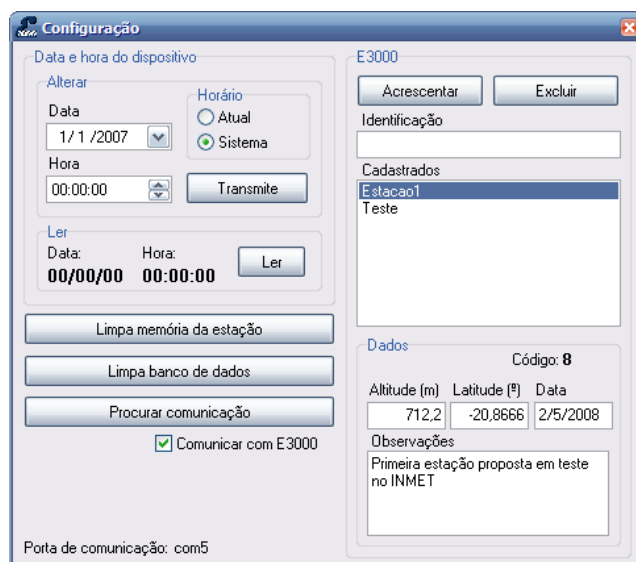


Figura 18 – Tela de configuração do E3000AD.

O E3000AD foi projetado para efetuar a leitura dos dados (Figura 19) de quatro maneiras: atual, automática, intervalo ou pontual. A opção atual mostra os dados em que estão sendo registrados no momento. A aquisição automática dos dados é realizada levando-se em consideração a data dos últimos dados registrados no banco de dados e a data e hora atual do equipamento. No modo intervalo, o usuário determina data e hora, iniciais e finais, da aquisição dos dados. No modo pontual, o usuário determina a data e hora que necessita ver os dados, sendo visualizados apenas dados horários. Ao realizar a leitura dos dados no modo atual ou pontual, o usuário apenas visualizará os dados; já no modo automático ou intervalo, os dados são registrados no banco de dados do programa. Os dados na aba “Tabela” são registrados de hora em hora.

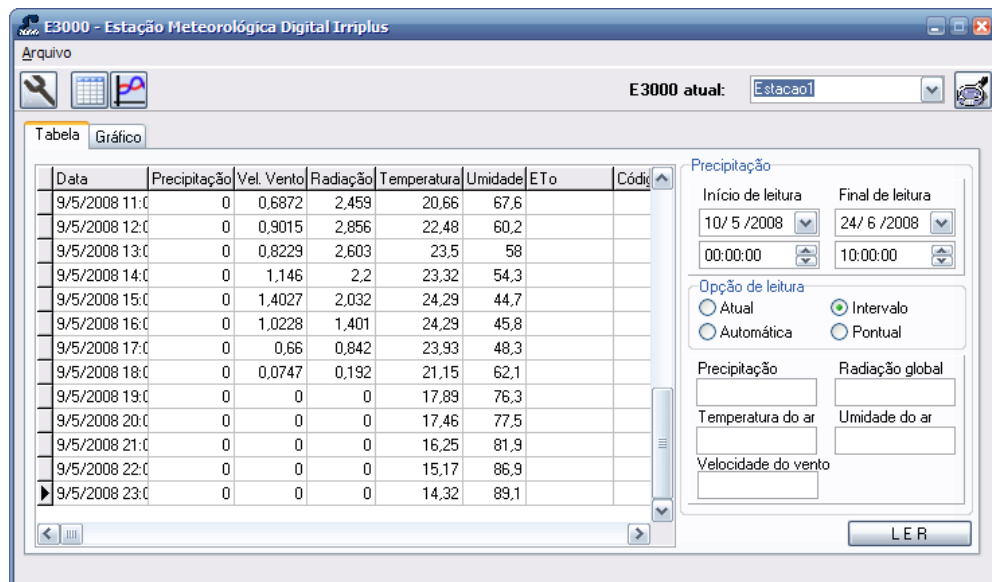


Figura 19 – Tabela do banco de dados do E3000AD.

Os dados históricos registrados no programa podem ser visualizados nos formatos de tabela e de gráfico. No modo de tabela, observam-se os dados somente na forma horária. No modo gráfico, deve-se preestabelecer o período a ser visualizado (Figura 20), para em seguida solicitar que o programa plote o gráfico. Foi inserido um botão “Excel” na tela gráfica para possibilitar a exportação dos dados para o programa Excel.

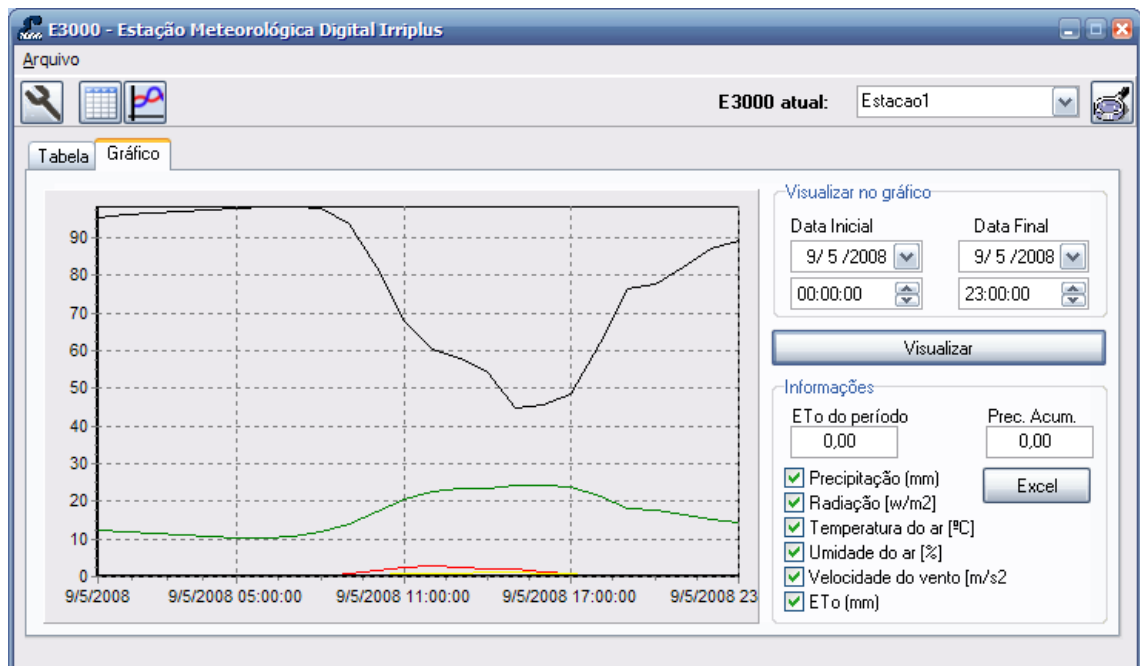


Figura 20 – Plotagem dos dados no programa E3000AD.

3.2. Calibração dos sensores

Pode-se dizer que um sensor está calibrado ao verificar que a resposta dele tem um erro menor do que o que foi projetado. É necessário que um sensor esteja calibrado para responder adequadamente às variações dos fenômenos meteorológicos. A junção de operações realizadas para equacionar o sinal de um sensor, criando uma relação direta entre o sensor-teste e o sensor-padrão, é chamada de calibração.

A calibração dos sensores propostos da EMA foi realizada com base nos procedimentos recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2006), estando descritas a seguir:

3.2.1. Anemômetro

Com o auxílio de um fluxo de ar gerado por um ventilador, efetuou-se a análise comparativa do anemômetro, realizada de forma que o ventilador foi posicionado em um ambiente fechado para não haver influência de fluxos de ar externos. Determinou-se a posição em frente do ventilador em que havia a menor variação de velocidade do vento com o anemômetro MDA-10, da Minipa Indústria e Comércio Ltda. O MAD-10 foi escolhido por ter exatidão de $\pm 3\%$ e resolução de 0,1 m/s.

Depois de localizada a posição do teste com os sensores, configurou-se o equipamento para atingir a mais baixa velocidade do vento na análise comparativa, sendo a velocidade do vento determinada pelo anemômetro digital de referência (MAD-10). Com a velocidade do vento estabilizada, retirou-se o sensor de referência e colocou-se o sensor proposto na mesma posição, para que este fosse atingido pelo mesmo fluxo de ar. Com o auxílio de um contador de pulsos (desenvolvimento próprio), verificou-se a totalização dos pulsos em um minuto para cada uma das cinco velocidades do vento trabalhadas.

3.2.2. Higrômetro

O higrômetro utilizado é um componente eletrônico comercial que já vem calibrado de fábrica; porém, para aferi-lo, foi realizado o procedimento-padrão de calibração com soluções salinas saturadas (Tabela 1) em um invólucro hermético (Figura 21), de forma a garantir a umidade relativa do ar com pequenas oscilações dentro do recipiente.



Figura 21 - Aferição do higrômetro desenvolvido.

A calibração do higrômetro foi dividida em etapas, de forma que o sensor a ser calibrado foi exposto inicialmente ao ambiente com umidade do ar constante de 11,3%; logo após, com 30,6%; e assim, sucessivamente, com as umidades de 32,8%; 54,0%; 75,2%; 90,0%; e 97,1%. É importante ressaltar que, ao colocar o sensor a ser calibrado no invólucro hermético, aguarda-se em torno de dois dias até que estabilize a umidade do ar dentro do recipiente para observar a resposta do sensor. Para verificar a estabilização do sensor, observou-se a sua resposta de 5 em 5 horas, até constatar que nesta não estava havendo modificações. Juntamente com o sensor de umidade do ar calibrado foi colocado um sensor de temperatura já calibrado, para medir a temperatura.

Tabela 1 – Umidades relativas mantidas por soluções saturadas de sais

Sal	Temperatura base (°C)	Umidade do ar (%)
Cloreto de lítio Li Cl	24,3	11,3
Cloreto de cálcio Ca Cl ₂	25,1	30,6
Cloreto de magnésio MgCl ₂	24,3	32,8
Nitrato de magnésio Mg (NO ₃) ₂	23,0	54,0
Cloreto de sódio Na Cl	26,9	75,2
Cloreto de bário Ba Cl ₂	25,6	90,0
Sulfato de potássio K ₂ SO ₄	22,1	97,1

Adaptado de: WMO, 2006; HALL, 1980.

3.2.3. Pluviômetro

A calibração do pluviômetro foi realizada em laboratório, com o auxílio de pipeta graduada de 15 ml e uma estrutura metálica (Figura 22). Criou-se a estrutura para que a calibração fosse executada com a mesma distância entre a balança e o funil, no caso real do sensor. Ao concluir a montagem da balança, esta é fixada abaixo do funil na estrutura e abre-se a torneira sobre a estrutura para que desça água com uma leve intensidade, simulando uma chuva. Com isso, o funil capta toda a água e a direciona na balança, onde se acumula até ocorrer o seu tombamento para o outro lado. É importante observar que, ao tombar, a água deve ser captada com um recipiente para futuramente se medir seu volume em uma pipeta calibrada. Repete-se o processo até que a balança esteja entornando com 11,5 ml de cada lado, resultando uma resolução de 0,33 mm.



Figura 22 – Calibração do pluviômetro desenvolvido.

3.2.4. Piranômetro

Posicionou-se o piranômetro (Figura 23) desenvolvido ao lado de um sensor-padrão do tipo termopilha, que foram expostos à luz solar e conectados a um sistema de aquisição de dados. A leitura foi realizada de minuto em minuto. Depois de obtidos os dados de irradiância solar de ambos os sensores (padrão e proposto), a média do sinal do sensor-padrão foi dividida pela média do sinal do sensor proposto, para encontrar a constante de ajuste do sinal deste último.

O sensor de irradiância solar foi instalado a uma altura de 1,5 m do solo, tomando-se o cuidado para que não houvesse nenhuma obstrução entre a luz solar e o sensor no sentido leste-oeste.



Figura 23 – Equipamentos utilizados na calibração do piranômetro desenvolvido.

3.2.5. Termômetro

O componente eletrônico LM35CAZ é um sensor de temperatura que já possui calibração de fábrica, sendo desnecessária sua calibração antes de colocá-lo na EMA desenvolvida. No entanto, para verificar sua exatidão, colocaram-se o sensor proposto e o de referência (termômetro de mercúrio do kit de calibração HMK15 da Vaisala – exatidão $\pm 0,3$ °C) em um mesmo ambiente, em uma mesma posição, sendo esse ambiente grande o suficiente para se ter menor oscilação térmica. Logo após, observaram-se as respostas dos sensores durante o dia e à noite, para verificar se a exatidão obtida estava dentro do estabelecido pelo fabricante ($\pm 0,5$ °C).

3.3. Comparação dos dados fornecidos pela estação meteorológica automática

A MAWS301 (EMA do INMET) está instalada em Viçosa, MG, com os sensores de temperatura do ar (QMH102), umidade relativa do ar (QMH102), pressão atmosférica (PMT16A), velocidade do vento (WAA151), direção do vento (WAV151),

precipitação (QMR102) e radiação solar global (CM6B), desde 14/07/2005, na latitude 20° 45' Sul, longitude 42° 52' Oeste e altitude 712 metros. Estação essa que integra, de minuto em minuto, os valores das observações obtidas por meio dos sensores e registra o total da integração em memória, de hora em hora. Considerando que essa estação é utilizada como base para fornecer dados meteorológicos para várias pesquisas na Universidade Federal de Viçosa, por meio dela se comparam os seus dados com os da estação desenvolvida neste trabalho, para verificar quão próximos estão os dados de ambas. A EMA desenvolvida neste trabalho foi projetada para realizar 20 leituras sucessivas para cada variável analógica por minuto, armazenando apenas a média dessas leituras. Ao concluir uma hora, calcula-se a média das leituras da hora corrente e armazena-se na memória da EMA.

A instalação da EMA desenvolvida foi realizada no dia 03/05/2008, no campo experimental do INMET (Figuras 24 e 25), ao lado das estações meteorológicas, automática e convencional, do 5º Distrito de Meteorologia de Viçosa. O período de aquisição dos dados foi de 17/05 a 12/06/2008; completando-se 27 dias ininterruptos de leitura das variáveis meteorológicas, com 648 horas.



Figura 24 – Instalação da EMA desenvolvida ao lado da EMA do INMET.



Figura 25 – Instalação da EMA desenvolvida ao lado da estação meteorológica convencional.

Os dados de velocidade do vento obtidos da EMA MAWS301 são correspondentes a uma altura de 10 m. Assim, para efetuar alguma comparação deve-se fazer a conversão dos dados correspondentes para uma altura de 2 m. Para efetuar a conversão, deve-se seguir a equação logarítmica (equação 3) recomendada por Allen et al. (1998). Pode-se observar, na Figura 32, os dados referentes à velocidade do vento da MAWS301 a 10 m de altura. Após multiplicar por 0,75 (valor obtido na equação 3), obtêm-se os dados de velocidade do vento para uma altura de 2 m, sendo esses dados expostos no gráfico da Figura 32.

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (3)$$

em que:

u_2 : velocidade do vento a 2 metros de altura do solo;

u_z : velocidade do vento a uma altura z do solo; e

z : distância do solo ao ponto em que se está convertendo os dados.

Após a instalação em campo, deixou-se o equipamento registrando os dados das variáveis meteorológicas, e durante esse período realizaram-se várias leituras dos dados no visor da EMA, como também por meio de um microcomputador. Após o

término do período de teste de campo, realizou-se a aquisição dos dados com o auxílio de um microcomputador, por meio do programa desenvolvido E3000AD.

De posse dos dados da E3000, passou-se para a análise destes. Para isso, torna-se necessário adquirir os dados da MAWS301 para efetuar as comparações. Os dados da EMA do INMET foram retirados do site www.inmet.gov.br. Inicialmente, comparam-se os dados no tempo, sendo realizada apenas uma comparação visual das diferenças entre eles.

Em seguida, criou-se o diagrama de dispersão para todas as variáveis meteorológicas. Observou-se nos diagramas criados desta pesquisa forte (intensidade) relação linear (forma) com associação positiva (direção) na relação entre os dados de todas as cinco variáveis meteorológicas estudadas.

Com a necessidade de determinar a relação entre as variáveis, utilizou-se o coeficiente de correlação (r), erro de viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), sendo esses calculados com o auxílio do programa Excel versão 2007, da Microsoft Corporation. As equações usadas foram as seguintes:

$$r = \frac{\left[\sum_{i=1}^n E_{E3000} (E_{INMET} - \overline{E_{INMET}}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{INMET} - \overline{E_{INMET}})^2 \sum_{i=1}^n (E_{E3000} - \overline{E_{E3000}})^2}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{E3000} - E_{INMET}) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{E3000} - E_{INMET})^2} \quad (6)$$

em que:

n : número de observações;

E_{E3000} : dados da variável que estiver sendo testada da EMA E3000;

E_{INMET} : dados da variável que estiver sendo testada da EMA MAWS301;

$\overline{E_{E3000}}$: média dos dados da variável testada da EMA E3000;

$\overline{E_{INMET}}$: média dos dados da variável testada da EMA MAWS301;

r: coeficiente de correlação;
MBE: erro de viés médio; e
RMSE: raiz do erro quadrático médio.

Após determinar r, MBE e RMSE de todas as variáveis meteorológicas, criou-se uma tabela para a melhor visualização desses dados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados obtidos nos procedimentos de calibração do anemômetro, higrômetro, termômetro e piranômetro, plotaram-se os diagramas de dispersão dos dados dos sensores desenvolvidos.

Com os dados de velocidade do vento obtidos por meio do anemômetro de referência e a quantidade de pulsos gerados pelo anemômetro desenvolvido, plotou-se o diagrama de dispersão dos dados da calibração do anemômetro (Figura 26). Procedeu-se, também, à análise de regressão dos dados para gerar a equação de calibração do sensor, resultando em um r^2 igual a 0,993.

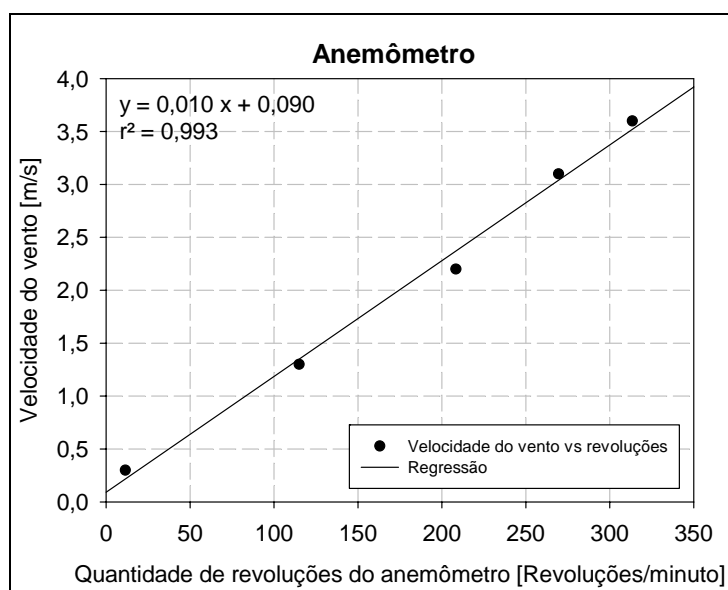


Figura 26 – Diagrama de dispersão dos dados do anemômetro desenvolvido.

A partir dos dados de umidade relativa do ar obtidos na Tabela 1 e dos dados de tensão elétrica do higrômetro desenvolvido, plotou-se o diagrama de dispersão dos dados da calibração do higrômetro (Figura 27). Também foi feita a análise de regressão dos dados para gerar a equação de calibração do sensor de umidade relativa do ar, resultando em um r^2 igual a 0,999. Resultado (r^2) esse, muito próximo do encontrado por Sugawara et al. (2003), que foi de 0,98.

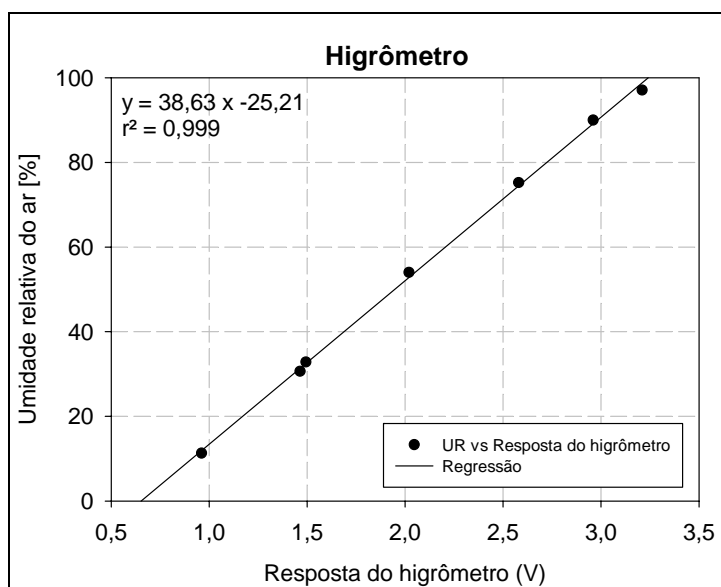


Figura 27 – Diagrama de dispersão dos dados do higrômetro.

Após obter os dados de irradiância solar do sensor de referência no período de 05/06 a 11/06, juntamente com os dados de tensão elétrica do piranômetro desenvolvido, plotou-se o diagrama de dispersão dos dados da calibração do piranômetro (Figura 28). Fez-se também a análise de regressão dos dados para gerar a equação de calibração do sensor de irradiância solar, resultando em um r^2 igual a 0,995.

Com os valores de temperatura do ar obtidos por meio do termômetro de referência, no período de 05/06 a 11/06/2007, juntamente com os dados de tensão elétrica do sensor de temperatura desenvolvido, plotou-se o diagrama de dispersão dos dados da calibração do termômetro (Figura 29). Fez-se também a análise de regressão dos dados para gerar a equação de calibração do sensor de temperatura, resultando em um r^2 igual a 1.

A aquisição dos dados resultou num total de 1.944 dados analógicos, com 1.200 leituras para cada média horária, totalizando 2.332.800 leituras para levantar

todos os dados analógicos. Foram obtidos, ainda, 1.296 dados com as variáveis digitais, resultando em 3.240 dados para todo o intervalo do experimento.

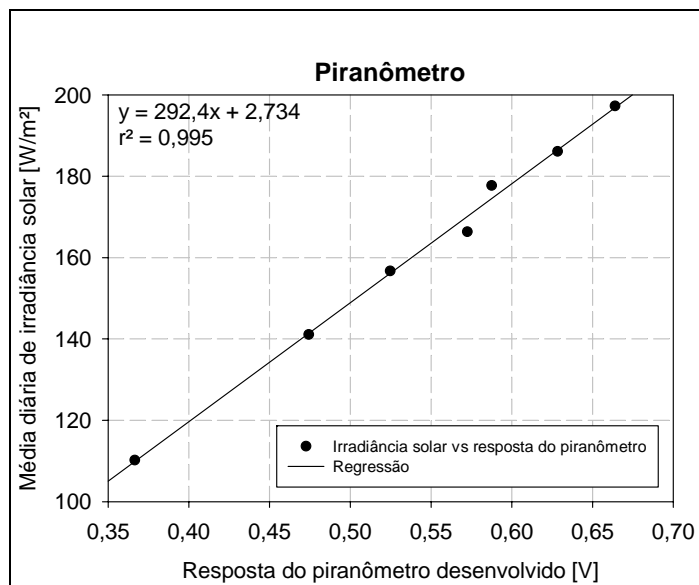


Figura 28 – Diagrama de dispersão dos dados do piranômetro desenvolvido.

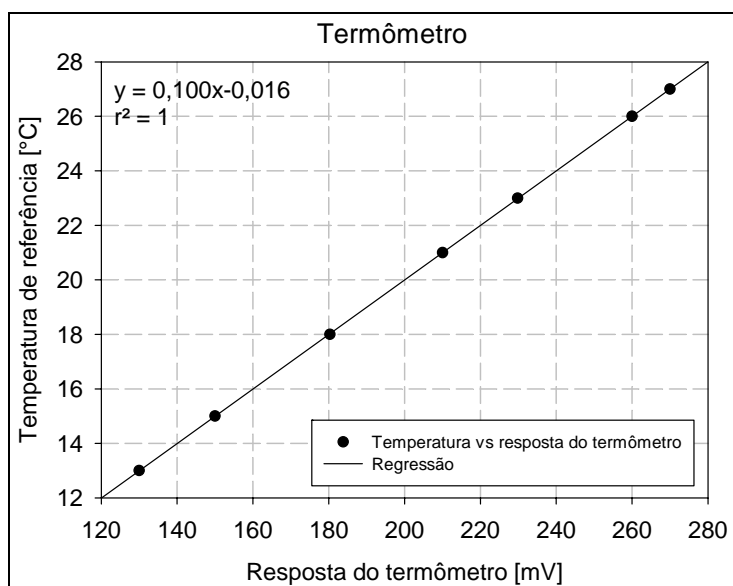


Figura 29 – Diagrama de dispersão dos dados do termômetro desenvolvido.

Podem-se visualizar os dados do período de 30/05/2008 a 05/06/2008 da E3000 e da MAWS301 a partir dos gráficos temporais das Figuras 30, 31, 32 e 33. Essas figuras correspondem às variáveis: umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento e irradiância solar, respectivamente.

Observa-se ligeira superestimação nos dados de umidade relativa do ar (Figura 30) e de temperatura do ar (Figura 31), obtidos na E3000 com relação aos dados conseguidos na MAWS301.

Verifica-se, na Figura 34, que redução na temperatura não proporcionou aumento na umidade relativa do ar quando esta se encontrava em 95%. Sabendo que quanto menor a temperatura do ar, maior sua umidade relativa (até 100%), pode-se dizer que os dados da MAWS301 estão sofrendo restrição em seu máximo de umidade relativa do ar, causando subestimação em seus dados. Com a certeza de uma calibração realizada nos sensores de umidade relativa do ar na E3000, juntamente com a subestimação dos dados da MAWS301, leva-se a crer que os dados da EMA desenvolvida estão próximos do real.

Com relação ao gráfico de temperatura (Figura 31), notou-se que os dados de temperatura do ar da E3000 seguem os da MAWS301 nos períodos em que se tem menor irradiância solar. Também, observou-se leve superestimação dos dados da E3000 nos períodos com maior irradiância solar.

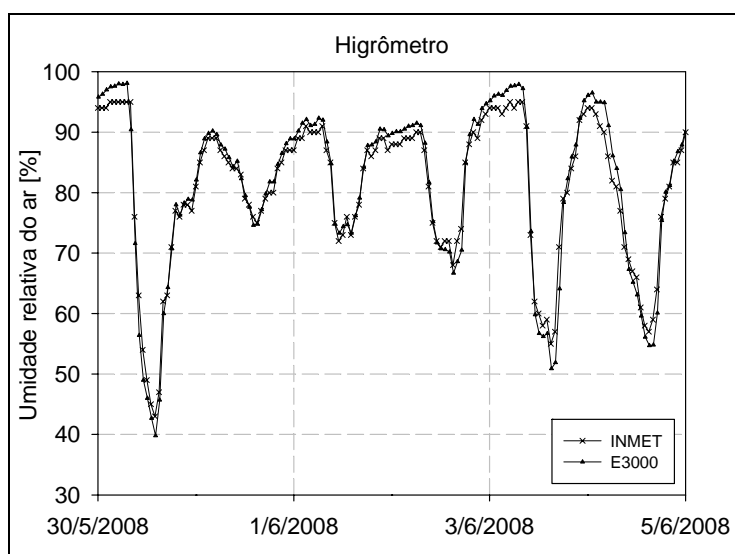


Figura 30 – Gráfico de comparação dos dados horários de umidade relativa do ar.

Percebe-se, Figura 32, ligeira diferença nas formas dos gráficos obtidos com os dados da E3000 e da MAWS301. É importante salientar que no local onde as EMAs foram instaladas havia, ao sul, uma barreira de árvores com mais de 10 m de altura e, ao norte, um declive de aproximadamente 25 m. Dessa forma, a barreira de árvores, juntamente com a declividade, provavelmente proporcionou o escoamento do ar em

forma turbulenta. Assim, é difícil afirmar que os dados de velocidade do vento medidos em 2 m de altura sejam iguais aos medidos a 10 m e convertidos para 2 m de altura.

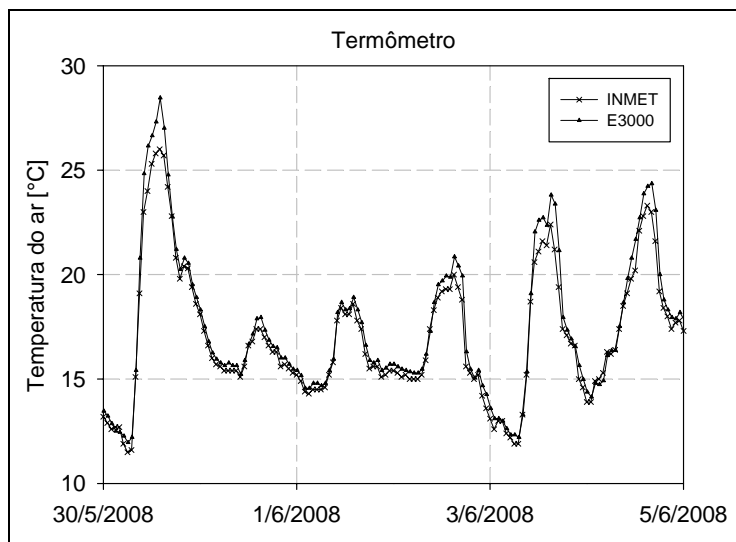


Figura 31 – Gráfico de comparação dos dados horários de temperatura do ar.

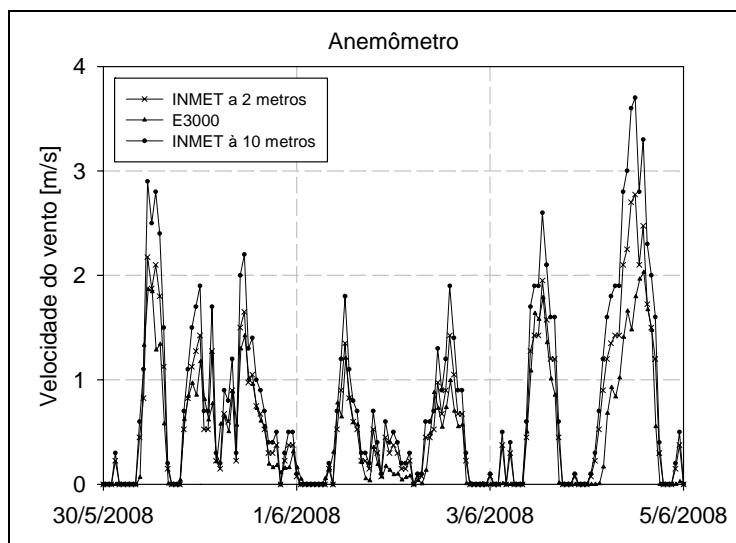


Figura 32 – Gráfico de comparação dos dados horários de velocidade do vento.

Observa-se, na Figura 33, grande semelhança visual entre os formatos dos gráficos obtidos com os dados da E3000 e da MAWS301, verificando maiores diferenças nos períodos próximos ao meio-dia e ao nascer e pôr-do-sol. Isso se deve ao fato de que a resposta do sensor de silício (Figura A1) é deficiente quando este é exposto a uma radiação cujo espectro é caracterizado principalmente por ondas com comprimentos na faixa do visível (400 nm a 750 nm).

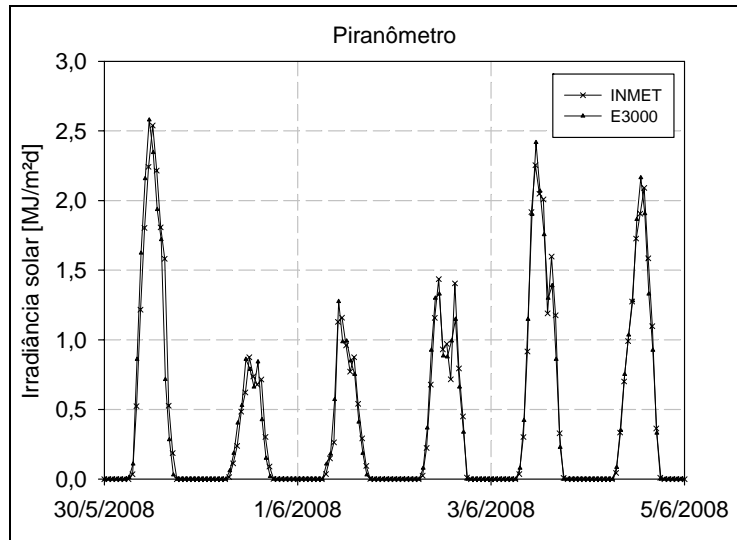


Figura 33 – Gráfico de comparação dos dados horários de irradiância solar.

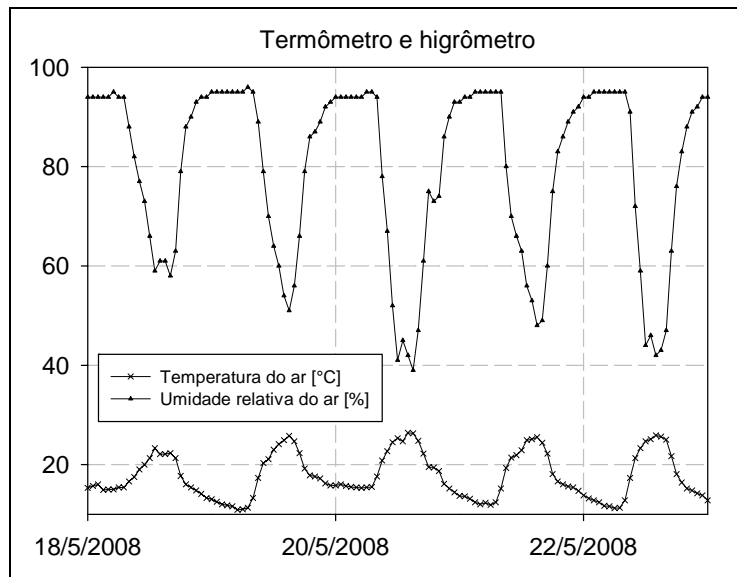


Figura 34 – Gráfico de comparação da umidade relativa do ar e temperatura ambiente.

Observam-se os gráficos (Apêndice B) comparativos entre os dados obtidos da EMA e os da MAWS301. É importante salientar que a comparação é feita apenas para verificar a diferença, e não o erro. Haveria erro se um dos equipamentos fosse considerado padrão.

Verifica-se forte relação linear com associação positiva em todos os diagramas de dispersão dos dados das figuras do Apêndice B, sendo o diagrama da Figura B5 o único com menor intensidade.

Observa-se, na Tabela 2, superestimação nas informações estatísticas (MBE) obtidas nos dados da E3000 de 0,184 °C e de 0,358% para as variáveis temperatura, bem como umidade relativa do ar, respectivamente. E uma subestimação nas médias dos dados de precipitação, irradiância solar e velocidade do vento de -0,019 mm, -0,238 MJ m⁻² d⁻¹ e -0,121 m s⁻¹, respectivamente. A dispersão dos dados (RMSE) calculada foi de 0,460 mm; 0,358 MJ m⁻² d⁻¹; 0,253 °C; 0,537%; e 0,146 m s⁻¹ para as variáveis precipitação, irradiância solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, respectivamente.

Os sensores da E3000 que melhor explicaram os dados da MAWS301 foram o pluviômetro e o piranômetro, com um índice de correlação igual a 0,999 e 0,998.

Encontrou-se um índice de correlação de 0,993 para o sensor de umidade relativa do ar da E3000. Entretanto, essa correlação, um pouco menor do que as anteriormente citadas, pode ser explicada pelo fato de o sensor da MAWS301 estar sofrendo algum tipo de restrição em seu valor máximo, o que causa subestimação nos dados de umidade relativa do ar da estação MAWS301, fazendo que os dados do higrômetro da E3000 pareçam superestimados.

Observou-se uma superestimação de 0,184 °C nos dados de temperatura do ar obtidos na E3000 em relação aos da MAWS301. Verifica-se, na Figura 33, que os dados da E3000 seguem muito bem os da MAWS301 nos períodos noturnos; porém, em períodos em que haja maior irradiância solar, percebe-se acréscimo na temperatura, sendo esse o provável fator que está causando a superestimação nos dados de temperatura da EMA desenvolvida. A influência da irradiância solar sobre a temperatura está sendo causada pelo fato de o abrigo termométrico desenvolvido absorver parte da energia solar, convertendo essa energia em energia térmica. Com o aquecimento do abrigo, cria-se um microclima com uma temperatura levemente acima da temperatura ambiente.

A variável com menor correlação foi a velocidade do vento, com um r igual a 0,911; ou seja, com os dados obtidos da E3000, pode-se explicar os dados da MAWS301 em apenas 91,1% dos casos testados. Esse baixo índice de correlação pode ser explicado pelo fato anteriormente mencionado, de se ter um deslocamento do ar de forma turbulenta sobre os sensores, fazendo com que a conversão dos dados do anemômetro de 10 m de altura não represente muito bem a velocidade do vento para uma altura de 2 m.

Tabela 2 – Informações resultantes da comparação estatística do equipamento

	Precipitação	Irradiância	Temperatura do ar	Umidade relativa do ar	Velocidade do vento
r	0,999	0,998	0,987	0,993	0,911
MBE	-0,019 mm	$-0,238 \frac{MJ}{m^2 d}$	0,184 °C	0,358%	$-0,121 \frac{m}{s}$
RMSE	0,460 mm	$0,358 \frac{MJ}{m^2 d}$	0,253 °C	0,537%	$0,146 \frac{m}{s}$
Coefficiente angular	1,025	1,050	0,910	0,935	1,233
Intercepto	-1,158	-0,427	1,396	4,836	0,033

5. CONCLUSÃO

O completo desenvolvimento de uma estação meteorológica automática nacional resultou em um equipamento com baixa complexidade na manipulação dos dados e na sua operacionalidade; auto-suficiência energética; e manipulação dos dados com e sem o uso de um microcomputador, além de ter sido desenvolvido com sensores que possuem conexão de engate rápido que facilitam a manutenção do equipamento.

Com os coeficientes de correlação entre os dados dos sensores desenvolvidos e os dados dos sensores do equipamento de referência iguais a 0,911; 0,993; 0,998; 0,999; e 0,987; respectivamente aos sensores anemômetro, higrômetro, piranômetro, pluviômetro e termômetro, conclui-se que o equipamento tem boa correlação na resposta de seus sensores.

Dessa forma, conclui-se que o equipamento desenvolvido satisfaz os requisitos técnicos e operacionais, implicando amplas condições de utilização na agricultura em geral.

7. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. v. 56, 300 p. (Irrigation and Drainage paper).
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 625 p.
- BOYLESTAD, R.L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 6. ed. [S.l.]: LTC, 1998. 649 p.
- CASTRO, E. Dinâmica socioeconômica e desmatamento na Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 8, n. 2, p. 5-39, 2005.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. ROME: FAO 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage, 24).
- GORAYEB, A.; SOUZA, M.J.N.; FIGUEIRÊDO, M.C.B.; ARAÚJO, L.F.P.; ROSA, M.F.; SILVA, E.V. Aspectos geoambientais, condições de uso e ocupação do solo e níveis de desmatamento da bacia hidrográfica do rio Curu, Ceará – Brasil. **Geografia**, v. 4, n. 2, 2005.
- HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport, Connecticut: the AVI Publishing Company, 1980. 382 p.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 2. ed. Rio de Janeiro; LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996. 292 p.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 jun. 2008.

- LEY, T.W.; HILL, R.W.; JENSEN, D.T. Errors in Penman-Wright Alfafa Reference Evapotranspiration Estimates: II. Effects of Weather Sensor Measurement Variability. **Transaction of ASAE**, v. 37, n. 6, p. 1863-1870, 1994.
- LIRA, F.A. **Metrologia na indústria**. 6. ed. [S.l.]: Érika, 2007. 246 p.
- MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação**: princípios e métodos. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007a. 358 p.
- MANTOVANI, E.C.; SOUZA, J.A.R.; SOUZA, D.O. Irrigação do tomateiro. In: SILVA, D.J.H.; VALE, F.X.R. **Tomate**: tecnologia de produção. Visconde do Rio Branco, MG: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2007b. 355 p.
- MANTOVANI, E.C.; VICENTE, M.R.; ALVES, M.E.B.; NETO, H.B. Irrigação como fator de qualidade do café. In: ZAMBOLIM, L. **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: DFP/UFV, 2006. 234 p.
- MANTOVANI, E.C.; VICENTE, M.R. Características rastreáveis dos sistemas de irrigação do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. **Rastreabilidade para a cadeia produtiva do café**. Viçosa, MG: DFP/UFV, 2007. 442 p.
- MOORE, D.S.; MCCABE, G.P. **Introdução à prática da estatística**. 3. ed. [S.l.]: LTC; 2002. 536 p.
- MOREIRA, H.M. **Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura do tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação**. 2002. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- MOURA, B.R. **Avaliação do uso da água em fruteiras irrigadas no projeto Jaíba**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- OLIVEIRA, A.S.; ANDRADE, F.S. **Sistemas embarcados**: hardware e o firmware na prática. 1. ed. [S.l.]: Érika, 2006. 316 p.
- ORDONEZ, E.D.M.; PENTEADO, C.G.; SILVA, A.C.R. **Microcontroladores e FPGAs** – Aplicações em automação. São Paulo: Novatec, 2005. 384 p.
- PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC**: programação em C. 1. ed. [S.l.]: Érika, 2003. 358 p.
- PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC**: técnicas avançadas. 5. ed. [S.l.]: Érika, 2002. 358 p.
- SEDRA, A.S.; SMITH, K. **Microeletrônica**. 4. ed. [S.l.]: Makron Books, 2000.

- SUGAWARA, M.T. **Estudo de sensores de baixo custo para estação meteorológica automática**: 2003. 68 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P.U.B. **Sensores industriais**: fundamentos e aplicações. 3. ed. [S.l.]: Érika, 2007. 220 p.
- TOCCI, R.J.; WIDMER, N.S. **Sistemas digitais**: princípios e aplicações. 7. ed. [S.l.]: LTC, 2000. 588 p.
- VAREJÃO-SILVA. **Meteorologia e climatologia** (digital). Recife, 2005. 516 p.
- WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 8 draft seventh edition, 2006. (World Meteorological Organization).
- ZANCO, W.S. **Microcontroladores PIC**: técnicas de software e hardware para projetos de circuitos eletrônicos com base no PIC 16F877A. 1. ed. [S.l.]: Érika, 2006. 390 p.
- ZELENOVSKY, R.; MENDONÇA, A.; **PC**: Um guia prático de hardware e interfaceamento. 3. ed. MZ Editora, 2002. 1031 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

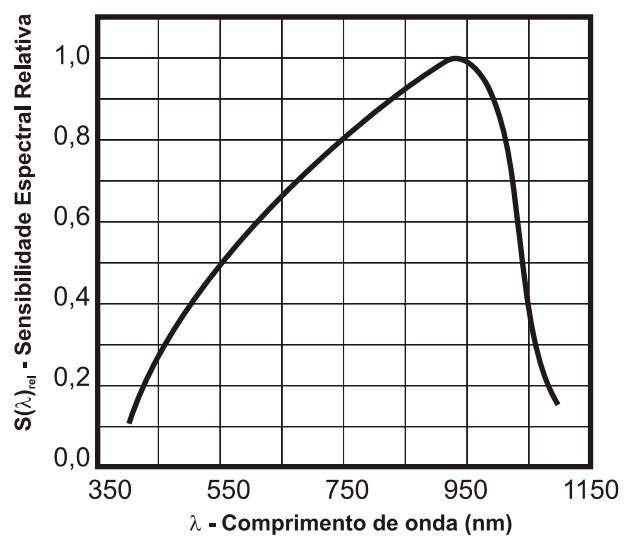


Figura A1 – Gráfico de sensibilidade espectral relativa *versus* comprimento de onda do sensor de irradiância.

APÊNDICE B

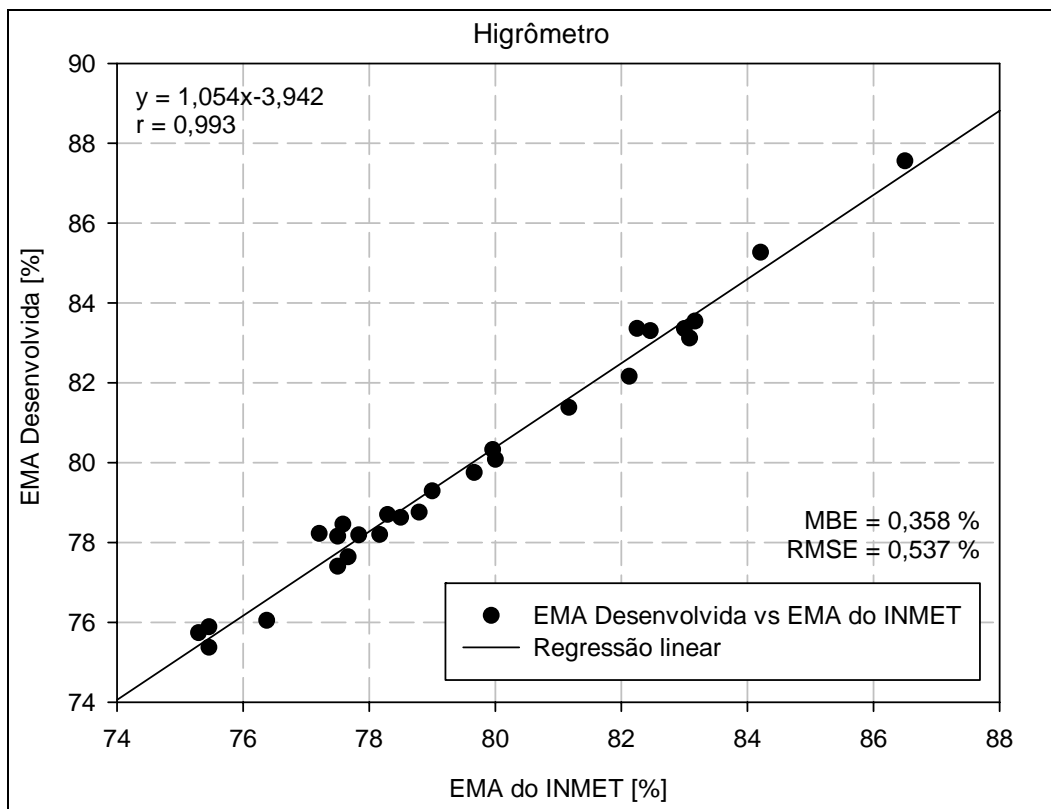


Figura B1 – Gráfico de comparação dos dados de umidade relativa do ar das EMAs.

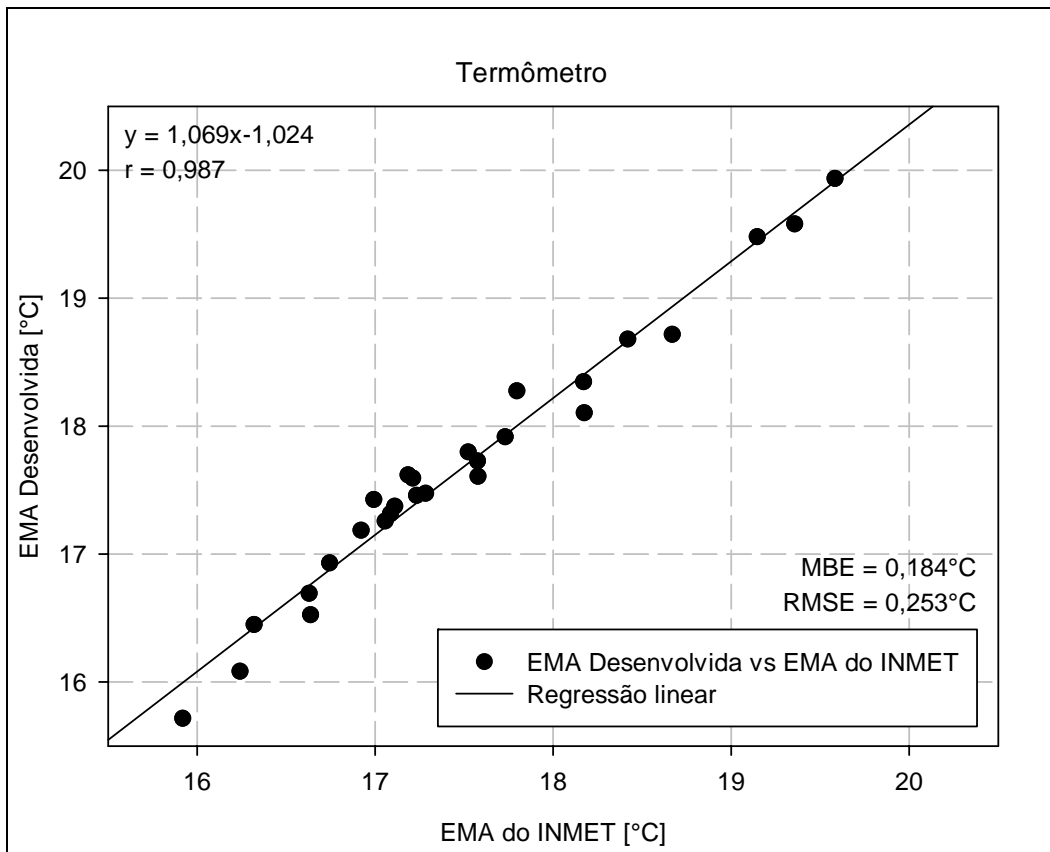


Figura B2 – Gráfico de comparação dos dados de temperatura do ar das EMAs.

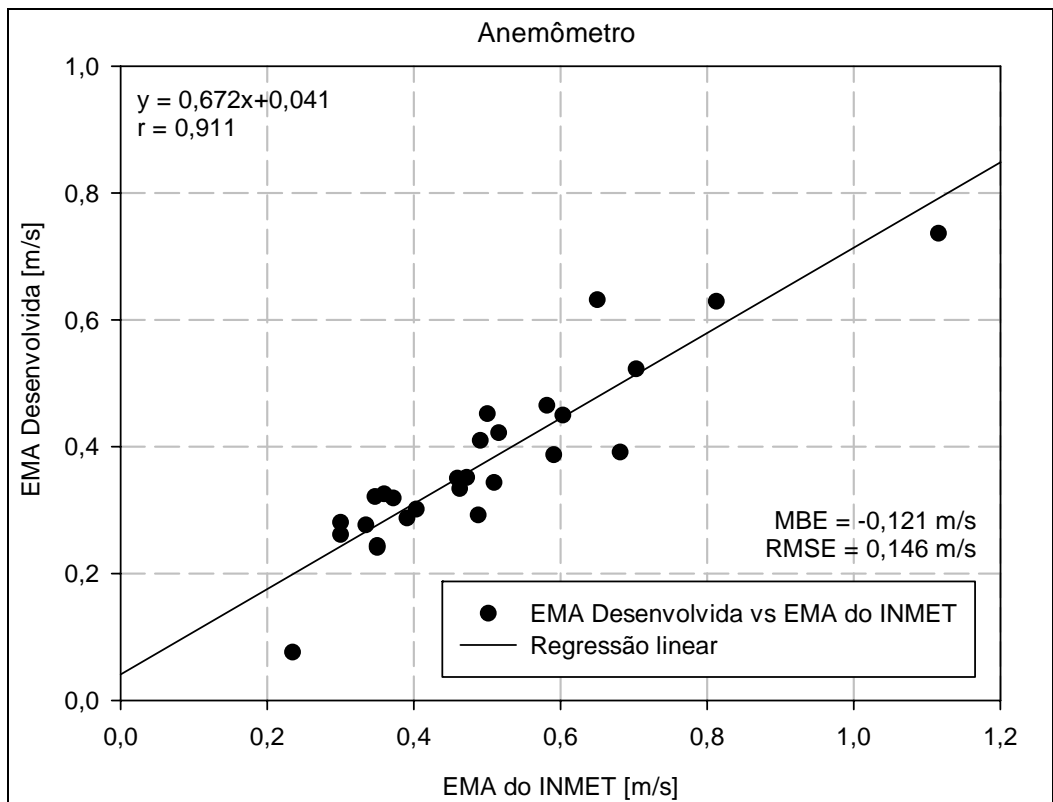


Figura B3 – Gráfico de comparação dos dados de velocidade do vento das EMAs.

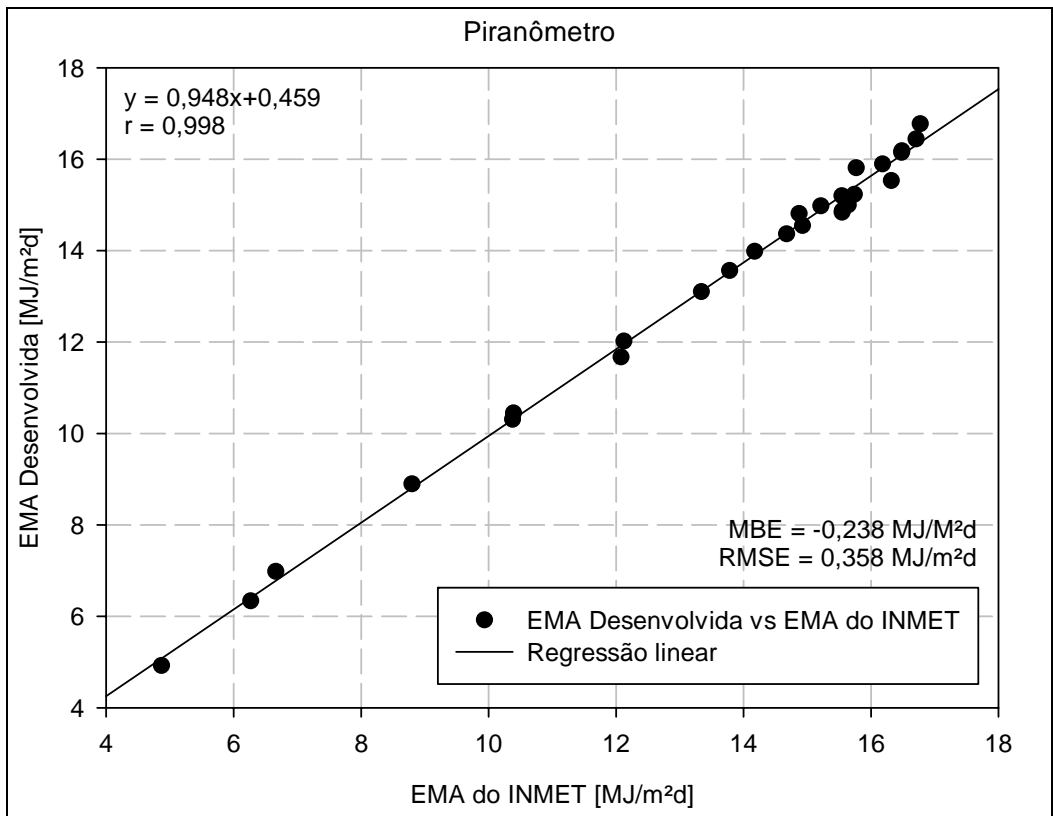


Figura B4 – Gráfico de comparação dos dados de irradiância solar das EMAs.

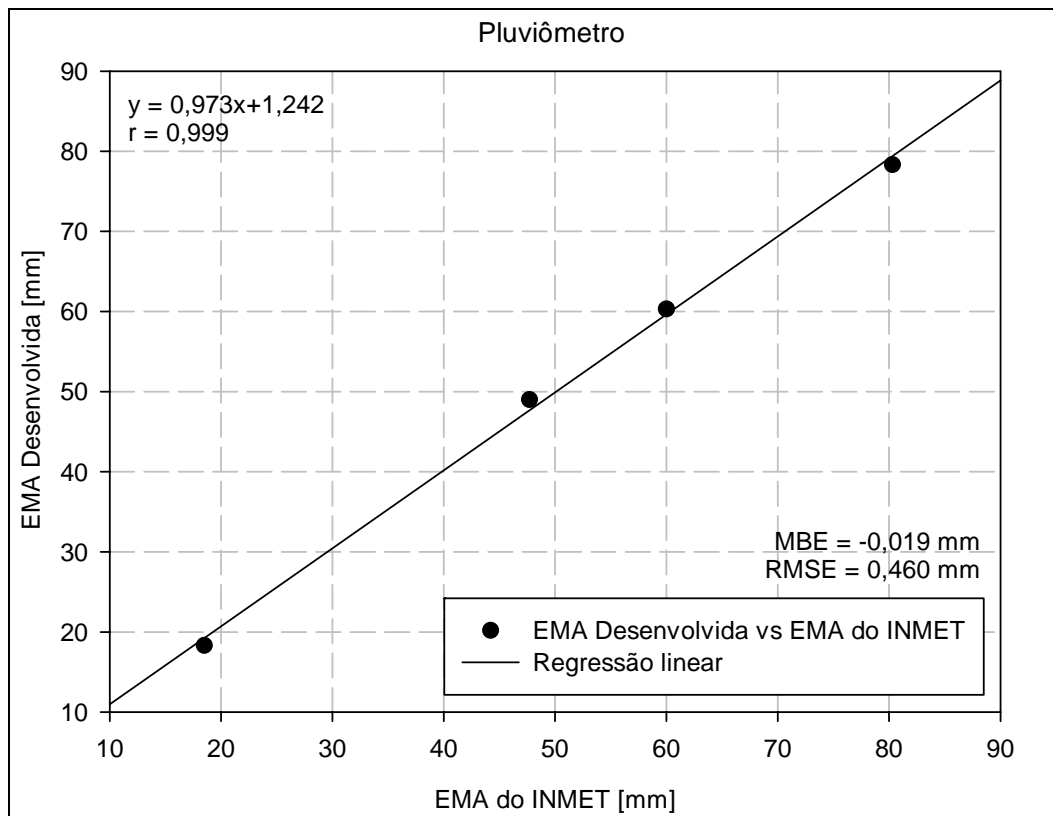


Figura B5 – Gráfico de comparação dos dados de precipitação das EMAs.

- * Os dados utilizados para criar o diagrama de dispersão dos dados de precipitação (Figura B5) foram obtidos no período de 26.01 a 07.02.2008, no campo experimental do INMET.

