

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA ESTIMAÇÃO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DO BALANÇO
HÍDRICO PARA REGIÃO NORTE FLUMINENSE UTILIZANDO
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA's)

MÁRCIO TAKESHI SUGAWARA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA/UENF** 008/2009

Sugawara, Márcio Takeshi

Sistema automatizado para estimação da evapotranspiração de referência e do balanço hídrico para região Norte Fluminense utilizando redes neurais artificiais (RNA's) / Márcio Takeshi Sugawara – 2008. 61 f.: il.

Orientador: Elias Fernandes de Sousa

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2008. Bibliografia: f. 56 - 61.

1. Microcontroladores 2. Sensores 3. Evapotranspiração 4. Redes neurais artificiais 5. Estações meteorológicas automáticas I. Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD – 630.2515

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA ESTIMAÇÃO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DO BALANÇO
HÍDRICO PARA REGIÃO NORTE FLUMINENSE UTILIZANDO
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA's)

MÁRCIO TAKESHI SUGAWARA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal”

Aprovada em 05 de março de 2008

Comissão Examinadora:

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama (*Ph. D.*, Engenharia Agrícola) – Purdue
University

Dr. Sidney Sára Zanetti (*D. Sc.*, Produção Vegetal) – UENF

Prof. Vicente de Paulo Santos de Oliveira (*D. Sc.*, Engenharia Agrícola) – UFV

Prof. Elias Fernandes de Sousa (*D. Sc.*, Produção Vegetal) – UENF
Orientador

AGRADECIMENTO

A Deus, por me dar condições de vencer os obstáculos e subir mais um degrau em minha carreira profissional e pela proteção e saúde, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Yoichi Sugawara e Fumie Mihara Sugawara, pelo apoio, incentivo e confiança.

À minha noiva Daniela Mayumi Sakuraoka, pela paciência, apoio e compreensão em todos os momentos.

À minha família Reiko, Márcia, Isamu, Kaname, Marisa, Lyoh, Ken, Hisami, Harumi, Yoichi, Minoru, Lídia, Cristiane, Renato e Batian, pelo apoio e incentivo.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela oportunidade de realizar este curso.

À Faperj/UENF pela bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Elias Fernandes de Sousa, meus especiais agradecimentos pela valiosa orientação e pelo apoio incondicional. E ainda por sua dedicação e exemplo de profissionalismo.

Ao Sidney Sara Zanetti, pelo apoio irrestrito, e em particular, pelo auxílio na execução da parte prática deste trabalho.

Ao professor Gilberto Chohaku Seidyama e sua família pelas valiosas orientações e sugestões; grande responsável pela minha formação profissional.

Ao professor Gustavo Bastos Lyra (UFAL), Vicente de Paulo Santos de Oliveira (CEFET-Campos) e Luiz Maurício de Oliveira Monteiro (UCAM-Campos) pelo apoio técnico e valiosas sugestões.

Aos companheiros de república, Sidney Zanetti e Guilherme Lyra, pelo companheirismo e apoio pelas valiosas sugestões, companheirismo e apoio em todos os momentos dessa jornada.

Aos amigos Marcela Campanharo, André Assis, Poliana Daré, Elton Moisés, Regiane, Derliane, Leandro Marelli pelo excelente convívio e apoios nesses anos de estudos.

A todos os meus colegas do corpo administrativo da UENF e PESAGRO-RIO que muito contribuíram para que este trabalho fosse concluído com êxito.

Aos colegas do curso de mestrado e doutorado pela amizade, momentos de descontração e longas horas de convívio.

Aos demais professores do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, UENF/CCTA pelo apoio e valiosas sugestões.

Aos professores do CEFET-Campos dos cursos de Técnico em Telecomunicações e Tecnólogo em Sistemas Elétricos pelo apoio incondicional durante o curso.

A todos que, de alguma forma, contribuíram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Evapotranspiração e manejo de irrigação	4
2.2. Evapotranspiração de referência (ET _o)	7
2.3. Monitoramento Automatizado	8
2.4. Microcontrolador	10
2.5. Redes Neurais Artificiais (RNA's)	13
2.6. ET _o e Redes Neurais Artificiais (RNA's)	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. Localização da Área	27
3.2. Caracterização Local	28
3.3. Protótipo do Equipamento	28
3.3.2. Microcontrolador	30
3.3.3. Módulo display LCD	31
3.3.4. Sensor de temperatura	32
3.3.5. Sensor de precipitação pluvial	33
3.3.6. Descrição do Circuito	34
3.3.7. Descrição do Programa	36
3.3.8. Abrigo meteorológico	38
3.4. Evapotranspiração de referência (ET _o)	39
3.5. Estimativa de ET _o usando a Rede Neural	40

3.6. Balanço hídrico.....	41
3.7. Avaliação dos resultados.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. Desempenho do Protótipo para estimação das temperaturas máxima e mínima.....	45
4.2. Desempenho do Protótipo para estimação da evapotranspiração	48
4.3. Desempenho do Protótipo para estimação do Balanço Hídrico	51
4.4. Custo do Protótipo.....	52
5. RESUMO E CONCLUSÕES	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

a	= Intercepto;
ARM	= lâmina de armazenamento da água sobre a superfície do solo, mm;
b	= Declividade;
b_1	= bias das camadas de neurônios ocultas;
b_2	= bias das camadas de neurônios de saída;
C	= coeficiente de escoamento superficial, adimensional;
c	= índice de confiança, adimensional;
CC	= umidade do solo na capacidade de campo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
CPU	= unidade central de processamento;
d	= índice de concordância, adimensional;
d_s	= densidade do solo, g cm^{-3} ;
EMA's	= estações meteorológicas automáticas;
EMC's	= estações meteorológicas convencionais;
EAM	= erro absoluto médio, unidade da variável em análise;
EQMs	= erro quadrado médio sistemático ;
EQMns	= erro quadrado médio não sistemático;
E_i	= valor estimado pelo modelo;
ET_o	= evapotranspiração de referência – Penman-Monteith, mm;
ET_H	= evapotranspiração de referência - Hargreaves & Samani, mm;
ET_r	= evapotranspiração real da cultura , mm;

HS	= Modelo de Hargreaves & Samani;
I/O	= portas de entradas e saídas;
K_c	= coeficiente da cultura, adimensional;
K_p	= coeficiente do tanque classe "A", adimensional;
LCD	= display de cristal líquido;
MBE	= erro sistemático;
MLP	= perceptron de múltiplas camadas;
n	= número de observações;
O_i	= valor observado experimentalmente, unidade da variável em análise;
\bar{O}	= média dos valores observados experimentalmente, unidade da variável em análise;
P	= probabilidade de significância do teste F, adimensional;
$P_{(j)}$	= precipitação ocorrida no dia j, mm;
PMP	= umidade do solo no ponto de murcha permanente, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
PM	= Modelo de Penman-Monteith;
REQM	= raiz do erro quadrado médio, unidade da variável em análise;
RMSEs	= erro sistemático;
RMSEns	= erro não sistemático;
RNA's	= redes neurais artificiais;
RAM	= memória de acesso aleatório;
ROM	= memória de leitura;
r^2	= coeficiente de determinação, adimensional;
s_d^2	= variância do MBE;
sO	= Desvio padrão dos valores observados;
sE	= Desvio Padrão dos valores estimados;
u_k	= junção aditiva;
ULA	= unidade lógica aritmética;
$w_{(k,j)}$	= pesos sinápticos;
w_i	= peso associado à entrada;
w_1	= matriz de pesos w_1 ;
w_2	= matriz de pesos w_2 ;
x_j	= limiar x_j do neurônio;
y_k	= sinal de saída do neurônio k;
θ	= limiar θ do neurônio.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 = Modelos de microcontroladores;
- Figura 2 = Arquitetura geral dos microcontroladores;
- Figura 3 = Procedimento básico para programação e utilização de microcontroladores;
- Figura 4 = Pesos e sinais de disparo que ocorrem na conexão;
- Figura 5 = Exemplos de funções de ativação;
- Figura 6 = Exemplos de arquiteturas de RNA;
- Figura 7 = Dados ajustados adequadamente;
- Figura 8 = Dados ajustados em excesso;
- Figura 9 = RNA desenvolvida por Zanetti et al. (2007);
- Figura 10 = Detalhe do neurônio de saída no modelo não linear utilizado;
- Figura 11 = Vista parcial da área experimental PESAGRO-RIO;
- Figura 12 = Protótipo instalado em campo;
- Figura 13 = Microcontrolador PIC-18F452 da marca MICROCHIP-TM;
- Figura 14 = Microcontrolador PIC-18F452 com identificação geral dos pinos e as respectivas funções;
- Figura 15 = Módulo de display de LCD;
- Figura 16 = Controlador HD44780 do módulo de display LCD;
- Figura 17 = Sensor de temperatura LM-35 da National Semiconductors;
- Figura 18 = Sensor de precipitação pluvial eletrônico Rain Collector II;
- Figura 19 = Modelo simplificado do esquema eletrônico do protótipo;

- Figura 20 = Placa mãe do Protótipo;
- Figura 21 = Fluxograma utilizado na programação do microcontrolador;
- Figura 22 = Abrigo do sensor de temperatura;
- Figura 23 = Protótipo do abrigo do sensor de temperatura;
- Figura 24 = Gráfico de desempenho do protótipo para estimativa da temperatura máxima;
- Figura 25 = Gráfico de desempenho do protótipo para estimativa da temperatura mínima;
- Figura 26 = Gráfico de desempenho do protótipo para estimativa da ETo pelo modelo de Hargreaves-Samani;
- Figura 27 = Gráfico de desempenho do protótipo para estimativa da ETo;
- Figura 28 = Gráfico do balanço hídrico do período.

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 = Microcontroladores encontrados no mercado.
- Quadro 2 = Dados de entrada propostos para estimação da ETo usando redes neurais artificiais;
- Quadro 3 = Matrizes de pesos e bias;
- Quadro 4 = Resultados do desempenho do Protótipo em relação às temperaturas máxima e mínima;
- Quadro 5 = Resultados do desempenho do Protótipo em relação à ETo_PM e ETo_HS;
- Quadro 6 = Tabela com os valores dos componentes utilizados.

RESUMO

SUGAWARA, Márcio Takeshi, *D. Sc.*; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Março de 2008. Sistema automatizado para estimação da evapotranspiração de referência e do balanço hídrico para região Norte Fluminense utilizando redes neurais artificiais (RNA's). Professor Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

Desenvolveu-se e testou-se um sistema automatizado de baixo custo para a estimação da evapotranspiração de referência (ET_o) e do balanço hídrico do solo. No desenvolvimento do Protótipo, foram utilizados um microcontrolador (PIC18F452), um sensor de temperatura (LM35), abrigo de sensor, pluviômetro eletrônico, outros componentes eletrônicos e um modelo de Rede Neural Artificial (RNA). A RNA tem como dados de entrada as temperaturas máximas e mínimas do ar, a radiação solar extraterrestre e o fotoperíodo máximo diário. Os dados coletados pelo protótipo foram as temperaturas máximas e mínimas do ar e a precipitação pluviométrica. Para cada dia, o microcontrolador foi programado para calcular as variáveis climatológicas, a ET_o (via RNA) e o balanço hídrico, mostrando os resultados no visor de cristal líquido (LCD). Comparou-se os valores de ET_o estimados pelo equipamento desenvolvido com os valores de ET_o calculados pelo modelo de Penman-Monteith (PM) e pelo método de Hargreaves & Samani (HS), utilizando-se os dados de uma estação meteorológica automática (EMA) Adolf Thies-Clima. A análise do resultado obtido para os dados de temperatura máxima e mínima demonstrou que o sensor de temperatura LM-35 teve desempenho satisfatório para todas as ferramentas de análise utilizadas. Para estimativa da evapotranspiração, os resultados indicaram que o modelo de RNA utilizado teve um melhor desempenho do que o modelo de HS, para todas as ferramentas de análise utilizadas. Os cálculos de Balanço hídrico calculados

pelo microcontrolador foram similares aos calculados pela planilha de dados. O custo total do Protótipo, incluindo o pluviômetro importado, foi de aproximadamente R\$ 2000,00. Considerando-se o dólar a R\$ 2,00 este valor representa apenas 20% do custo de uma estação meteorológica automática comercial, sendo mais viável a aquisição e o uso do protótipo pela maioria dos produtores agrícolas.

ABSTRACT

SUGAWARA, Márcio Takeshi, *D. Sc.*; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; March, 2008. Automated system to estimating the reference evapotranspiration and the water balance to the North Fluminense region using artificial neural network (RNA); Advisor: Elias Fernandes de Sousa.

A low-cost automated system was developed and tested towards estimating the reference evapotranspiration rates (ET_o) and the soil water balance. A microcontroller (PIC18F452), a temperature sensor (LM35), a sensor shield, an electronic rainfall gauge, others electronics components, and an Artificial Neural Network (RNA) model algorithm were used in developing the automated prototype. The RNA used the air maximum and minimum temperatures, extraterrestrial solar radiation and maximum daily photoperiod as input. The data collected by the prototype were the maximum and minimum air temperatures and rainfall. The microcontroller was programmed to calculate the each day climatological variables, such as the ET_o and soil water balance (via RNA), showing the results in a liquid crystal display (LCD). The estimated ET_o values obtained by the developed equipment were regressed with the values of calculated ET_o by the Penman-Monteith (PM) model and the Hargreaves & Samani (HS) method using the data from an Adolf Thies-Clima automatic weather station (EMA) as comparison criterion. The analysis of the results obtained from the data of maximum and minimum temperature showed that the LM-35 temperature sensor performance was reliable to all the analysis tools used. The results of the

evapotranspiration rates estimates indicated that the RNA model algorithm used performed a better output values than the HS model, for all the tools of analysis used. The estimated water balance results obtained from the microcontroller were similar to those calculated by the spreadsheet data. The total cost of the prototype, including the imported overseas rainfall gauge, was approximately R\$ 2000.00, considering an exchange rate of R\$ 2.00 per dollar, which represents only 20% of the cost of a brand new automated meteorological station. It can be said that the developed microcontroller is feasible for most farmers to acquire and use it routinely.

1. INTRODUÇÃO

A água tem valor inestimável para o homem. Por outro lado, gradativamente, vem se tornando um recurso natural escasso. A diminuição da disponibilidade de água para as atividades antrópicas deve-se principalmente a duas razões: a contaminação dos mananciais com elementos tóxicos e o aumento da utilização da água na atividade agrícola.

Para suprir a demanda crescente de alimentos, devido ao intenso crescimento populacional, há a necessidade de utilização de técnicas que permitam a potencialização da produção agrícola, sendo a irrigação uma delas. Porém, a irrigação é uma prática que consome uma elevada parcela da água doce do planeta.

Segundo Sousa et al. (2002), um sistema de irrigação é bem projetado e manejado quando a aplicação de água é feita em bases racionais, em quantidade e frequência desejável para o pleno desenvolvimento da cultura, utilizando-se de forma criteriosa os recursos hídricos disponíveis. Para tanto, é crucial quantificar a evapotranspiração dos cultivos.

No manejo racional de qualquer projeto de irrigação, deve-se considerar aspectos sociais e ambientais, procurando maximizar tanto a produtividade quanto a eficiência do uso da água e minimizar os custos, quer de mão-de-obra, quer de capital, mantendo-se as condições de umidade do solo e de sanidade favoráveis ao satisfatório desenvolvimento das culturas.

Para o adequado manejo da irrigação é necessário o monitoramento da

evapotranspiração durante o ciclo da cultura. Para tanto, é indispensável o conhecimento de parâmetros relacionados à planta, ao solo e ao ambiente, para se determinar o turno de rega e a lâmina de água a ser aplicada.

No Brasil, de modo geral, o investimento aplicado para monitorar os parâmetros necessários à irrigação é escasso, conseqüentemente, seu manejo é inadequado, ou mesmo inexistente, particularmente nas pequenas e médias propriedades agrícolas. Estes problemas são agravados pelo fato de a maioria dos equipamentos utilizados no monitoramento serem de tecnologia importada, tanto para o monitoramento da planta quanto do solo e do ambiente.

O monitoramento do consumo de água, tendo como referência o solo e a planta, ainda não é muito aplicável às condições de campo, seja pela falta de representatividade de alguns métodos, por utilizar sistemas pontuais de medição, seja devido ao custo elevado dos equipamentos, ou pela demanda elevada de mão de obra para realizar as medições.

Atualmente, o monitoramento do consumo de água pelas plantas, baseado nas condições ambientais, tem sido adotado com maior freqüência. Isto se deve ao fato de que essa abordagem mostra representatividade superior aos métodos baseados apenas no solo, ou na planta, sendo economicamente viável para o manejo da irrigação. Para o monitoramento do ambiente, pode-se utilizar desde o termômetro (de máxima e mínima) até uma estação meteorológica automática. O primeiro pode ser utilizado por pequenos produtores, mas a segunda apenas por grandes produtores, em função do custo elevado dos equipamentos.

As variáveis meteorológicas necessárias para aplicação de métodos mais sofisticados de estimação da evapotranspiração de referência (ET_o), como o de Penman-Monteith (PM), nem sempre são disponíveis, particularmente, as relacionadas à demanda evaporativa da atmosfera (velocidade do vento e déficit de pressão do vapor d'água do ar).

Segundo Pereira et al. (1997), as técnicas mais complexas para estimar a evapotranspiração de referência quase sempre se restringem à pesquisa, devido aos altos custos dos equipamentos. Com isso, tornam-se importantes os métodos para estimar a ET_o em função dos elementos climáticos que podem ser obtidos de forma prática, como por exemplo, a temperatura do ar e a radiação solar extraterrestre (Hargreaves & Samani, 1985).

Visto o elevado custo do monitoramento do ambiente em relação ao

consumo de água no sistema agrícola, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas que ofereçam aos produtores alternativas para o manejo da irrigação.

Diante da necessidade de facilitar a estimativa da ETo para o manejo de irrigação, os objetivos deste trabalho foram:

- Desenvolver e avaliar um equipamento para o monitoramento do ambiente, com vista a estimação da ETo e do balanço hídrico;
- Utilizar o modelo gerado por rede neural com um número mínimo de sensores necessários à estimação da ETo;
- Comparar os valores medidos da ETo com o equipamento desenvolvido com os valores calculados pelos modelos de PM e HS;
- Calcular o balanço hídrico seqüencial utilizando a ETo obtida pelo equipamento de baixo custo e a ETo estimada pelo modelo de PM; e
- Verificar o desempenho do protótipo em relação aos valores de temperatura (máxima e mínima) e de ETo estimada pela rede neural (Zanetti et al., 2007).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração e manejo de irrigação

Com o aumento dos conflitos de setores que utilizam os recursos hídricos disponíveis, a cobrança pelo uso da água e as exigências do mercado exterior por produtos certificados, decorrentes de uma atividade agrícola sustentável, têm aumentado a importância do manejo da irrigação (Coelho Filho et al., 2002).

Uma irrigação não pode e não deve ser entendida, única e exclusivamente, como um procedimento artificial para atender às exigências de umidade de solo, visando à melhoria da produção agrícola, tanto em quantidade quanto em qualidade. Na realidade, ela constitui um conjunto de operações (compondo um sistema) necessário tanto para atender às necessidades hídricas das plantas, quanto para eliminar os excessos que transcendem à relação solo-água-planta (Espindula Neto, 2002).

O manejo racional de qualquer projeto de irrigação deve considerar os aspectos sociais e ecológicos envolvidos, procurar maximizar a produtividade e a eficiência do uso da água, bem como minimizar os custos com mão-de-obra capital, mantendo as condições de umidade do solo favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura irrigada, incluindo os aspectos fitossanitários. Além disso, é necessário que o projetista tenha em mente a necessidade de melhorar ou, no mínimo, manter as condições físicas, químicas e biológicas do solo, o que afetará bastante a vida útil do projeto (Bernardo, 1996).

Para o manejo adequado da água de irrigação é necessário o monitoramento da umidade do solo e/ ou da evapotranspiração durante a maior parte do ciclo de desenvolvimento da cultura. Para tanto, é indispensável o conhecimento de parâmetros relacionados às plantas, ao solo e ao clima, para determinar o momento oportuno de irrigar e a quantidade de água a ser aplicada (Marouelli e Silva, 1998).

A quantidade de água a ser aplicada pode ser baseada em critérios relacionados ao status da água no solo e nas plantas, taxa de evapotranspiração da cultura ou na combinação de dois ou mais critérios ou parâmetros. A escolha do critério vai depender da disponibilidade de informações e do nível tecnológico da produção (Marouelli e Silva, 1998).

Sediyama et al. (1998) recomendam no manejo de irrigação, que os resultados de pesquisa de campo devem ser utilizados diretamente na estimativa das exigências hídricas das culturas. Entretanto, tais informações não estão disponíveis ou, muitas vezes, não são aplicáveis a todos os locais.

A evapotranspiração pode ser determinada por métodos diretos, com o emprego de lisímetros, ou estimada indiretamente, utilizando-se evaporímetros ou modelos matemáticos. Tais modelos podem variar de uma simples relação empírica, baseada em dados de temperatura, a relações complexas, baseadas em processos físicos que envolvem vários elementos do clima.

Existem muitas maneiras de medir a evapotranspiração, mas, devido aos altos custos dos equipamentos, tais técnicas quase sempre se restringem à pesquisa (Pereira et al., 1997).

Para as áreas irrigadas, é de grande importância o conhecimento dos métodos simples de estimativa da evapotranspiração, que demandam dados de fácil obtenção e de baixo custo, porém com confiabilidade local razoável para a adoção de um manejo adequado de irrigação (Bonomo, 1999).

Vários métodos de estimativa da evapotranspiração têm sido desenvolvidos e testados, os quais vão desde métodos simples, que requerem apenas dados de temperatura mensal (Thornthwaite, 1948), até métodos baseados em processos físicos, que requerem vários dados de entrada, como o modelo de PM FAO-56 (Allen et al., 1998).

Na ausência de equipamentos para medição da evapotranspiração dos cultivos, os pesquisadores, muitas vezes, lançam mão de estimativas baseadas

na evapotranspiração de referência e no coeficiente de cultura (K_c) (Medeiros et al., 2003).

A estimação da evapotranspiração das culturas (ET_c), normalmente, envolve um processo que se desenvolve em duas etapas. Na primeira, estima-se a evapotranspiração de uma cultura de referência, (grama batatais) utilizando uma equação empírica ou semi-empírica. Na segunda etapa, a ET_c é obtida multiplicando-se ET_o por um coeficiente de cultura (K_c) que integra as características da cultura e do clima local (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Ao longo dos anos tem sido desenvolvido um grande número de métodos para o cálculo da ET_o a partir de dados meteorológicos, realizando-se testes em diferentes condições climatológicas e geográficas.

Em 1990, especialistas de vários países concluíram que o conceito de evapotranspiração de referência, até então empregado, apresentava problemas, principalmente relacionados com a variabilidade das culturas de referência atualmente em uso, levando a erros de sub e superestimações dos principais métodos indiretos utilizados para estimar a ET_o , além da existência de dificuldades experimentais para contrastá-los (Bonomo, 1999).

Essas condições dificultavam a determinação padronizada da ET_o em grande escala; por isso, os pesquisadores decidiram propor um novo conceito de cultura de referência, baseado na equação de Penman-Monteith padronizada para os termos de resistência aerodinâmica e da cultura às perdas no processo evaporativo (Smith et al., 1991).

Estudos conduzidos por diferentes pesquisadores, em diferentes localidades e condições climáticas, indicam que o modelo de Penman-Monteith tem apresentado estimativas de ET_o para a grama de forma consistente e bem correlacionadas com os valores medidos em lisímetros, tanto na escala diária e decenal, quanto na mensal, indicando que este modelo pode ser utilizado com sucesso na determinação das necessidades de água das culturas como padrão para calibração de outros modelos empíricos, na ausência de dados de lisímetros (Allen, 1986; Jensen et al., 1990).

Embora numerosos estudos tenham mostrado que o método de PM seja o mais apropriado para estimativa da ET_o , a obtenção dos dados é difícil e o custo é elevado. Em condições em que se dispõe apenas de dados de temperatura máxima e mínima do ar, freqüentemente são usados os métodos de Hargreaves

& Samani (1985) ou de Thornthwaite (1948) para estimar a ETo (Amatya et al., 1995). Entretanto, o primeiro método superestima a ETo e o segundo a subestima para locais de clima úmido, segundo observaram Jensen et al. (1990).

Assim, a comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) consideram o método de Penman-Monteith (PM) como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (Smith, 1991; Allen et al., 1998).

2.2. Evapotranspiração de referência (ETo)

A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico.

A taxa de evapotranspiração refere-se ao total da perda de água para a atmosfera, da superfície do solo e das plantas pela combinação simultânea da evaporação com a transpiração (Sediyama, 1998).

Segundo Pereira et al. (1997), o consumo de água pela cultura é denominado de evapotranspiração da cultura (ETc), que é a ocorrência simultânea de dois processos importantes no cultivo das plantas, a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas .

Burman et al. (1983) revisaram vários métodos de determinação da evapotranspiração, adotados em diversas partes do mundo. Estes autores classificaram os métodos em dois grandes grupos: o primeiro grupo inclui os métodos onde a evapotranspiração potencial pode ser determinado a partir de medidas diretas, como ocorrem com os lisímetros. No segundo grupo estão os métodos determinados através de dados climáticos, também chamados de métodos indiretos, nos quais a evapotranspiração de referência é estimada por fórmulas empíricas e racionais, sendo, posteriormente, correlacionadas com a evapotranspiração da cultura por meio de coeficientes de proporcionalidade, tais como o coeficiente do tanque classe "A" (K_p) e o coeficiente de cultura (K_c).

Visando padronizar a definição de evapotranspiração dada por diversos autores, entre eles Thornthwaite (1948) e Penman (1948), surgiu a necessidade de se definir a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência (ETo). Essa, segundo Smith (1991), é a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura de 12 cm, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s.m^{-1}

¹ e albedo de 0,23.

Allen et al. (1994) apresentaram considerações teóricas e práticas no intuito de encorajar a adoção do novo conceito da cultura de referência, em que a ETo é redefinida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, proposta por Smith (1991), sendo a equação de Penman-Monteith recomendada como representante do novo conceito de ETo.

Segundo Sedyama (1996), essa evapotranspiração de referência assemelha-se, bem de perto, à evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

A estimativa da ETo é de fundamental importância para o dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação, o que requer a adoção de estudos, avaliações e ajustes para sua correta utilização.

A escolha de um método de estimativa da ETo depende de uma série de fatores, tais como a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo desejada.

Métodos complexos, como o de Penman-Monteith, exigem grande número de variáveis meteorológicas e, por isso, têm aplicação limitada, somente sendo utilizados quando há disponibilidade de todos os dados necessários, o que, na prática, só é viável em situações específicas, como órgãos de pesquisa.

Como alternativa para solucionar este problema, destaca-se o uso dos métodos empíricos de estimativa da ETo, os quais, por serem desenvolvidos e calibrados com dados locais, não podem ter aplicação universal, porém apresentam melhores resultados do que aqueles mais genéricos e fisicamente mais reais (Pereira et al., 1997).

2.3. Monitoramento Automatizado

Automação pode ser definida como sendo o sistema automático pelo qual mecanismos controlam seu próprio funcionamento, quase sem a interferência do homem. Podemos ter automação de processos, que envolve o controle e instrumentação de etapas dos sistemas de produção; e a automação do gerenciamento e tomada de decisões através de sistemas de informação (Alencar et al., 2007).

Atualmente, entende-se por automação qualquer sistema, apoiado em processadores, que substitua o trabalho humano e que vise soluções rápidas e econômicas, a fim de alcançar os complexos objetivos das indústrias, da agricultura e serviços.

Nas duas últimas décadas os avanços tecnológicos na área de eletrônica e automação apresentaram substancial desenvolvimento, permitindo o monitoramento das mais diversas variáveis em tempo real e com níveis de precisão até então não experimentados; e os sensores eletrônicos passaram a apresentar duas características distintas: maior resolução/precisão e menor tamanho (Souza et al., 2002).

O monitoramento automático na agricultura pode contribuir, segundo Torre Neto (1995), para o aumento da produtividade, para a melhoria da qualidade dos produtos e na preservação dos recursos naturais.

Os autores Hubbard et al. (1983); Hubbard (1994); Hubbard & Klocke (1996); Fernandes et al. (1995); Curry et al. (1981); Cockerham & Ortega (1989), em estudos agrometeorológicos, observaram que os sensores eletrônicos permitem a obtenção de variáveis do clima praticamente em tempo real e a tomada de decisões com relação ao manejo de irrigação, à aplicação de defensivos, ao risco de incêndios, à previsão de geadas, à ocorrência de pragas e doenças, à classificação climática, ao zoneamento agrícola, entre outras aplicações.

Ashraf et al. (1996) definem dois tipos de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA's), a primeira, aquela denominada de "full weather station", porque monitora todas as variáveis necessárias para estimativa de evapotranspiração pelo método de PM (Allen, 1998), e a segunda, denominada de "partial weather station", por não monitorar todas as variáveis necessárias para o tal fim.

Nos últimos anos, na agricultura irrigada, tem sido observado um avanço da automação nos sistemas. A automação implica na implantação de sistemas interligados e assistidos por redes de comunicação, compreendendo Sistemas Supervisórios e Interfaces Homem-Máquina (IHM), que podem auxiliar os operadores no exercício de supervisão e análise dos problemas que porventura venham a ocorrer (Alencar et al., 2007).

Nos diversos setores produtivos, a automação decorre de necessidades,

tais como: maiores níveis de qualidade de conformação e de flexibilidade, menores custos de operação, menores perdas de materiais, menores custos de capital, maior controle das informações relativas ao processo, maior qualidade das informações e melhor planejamento e controle da produção (Moraes e Castrucci, 2001).

2.4. Microcontrolador

O microcontrolador é um componente eletrônico programável, utilizado no controle de processos lógicos (Souza, 2003; Pereira, 2004).

Atualmente, é um componente indispensável na vida moderna; está presente em agendas eletrônicas, telefones celulares, máquinas fotográficas digitais, alarmes, controladores lógico-programáveis (CLP), veículos, caixas eletrônicas, impressoras e em muitos outros produtos de uso cotidiano, inclusive na agricultura.

Diferentemente dos processadores, os microcontroladores integram em um único CHIP; o processador, uma memória RAM (dados), uma memória ROM (programa) e outros recursos (Souza, 2003; Pereira, 2004; Exsto Tecnologia, 2003).

Estes componentes são conhecidos como Sistemas Embutidos, do inglês Embedded System, pois é embutido dentro de um sistema fechado e com funções bem específicas. Em geral, esses sistemas exigem um controle preciso do tempo, uma vez que trabalham em tempo real. A capacidade de processamento e memória variam de acordo com a aplicação. A aplicação pode ser um simples relógio ou um equipamento industrial complexo que envolve até vários sistemas operacionais executados sobre o microcontrolador (Souza, 2003; Pereira, 2004).

Na Figura 01, temos alguns modelos de microcontroladores disponíveis para aquisição.

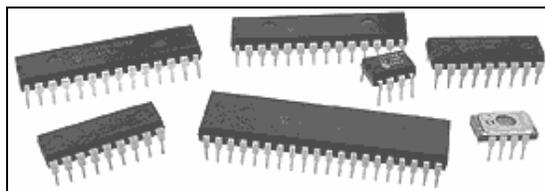


Figura 01 – Modelos de microcontroladores.

Em sua parte interna, são constituídos de uma arquitetura semelhante a apresentada na Figura 02, sendo composta por uma memória de programa e dados, uma unidade lógica aritmética (ULA), processador central (CPU), periféricos e linhas de entrada ou saída (I/O) (Souza, 2003; Pereira, 2004).

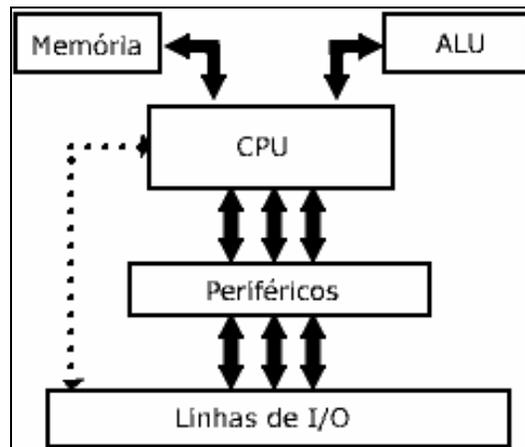


Figura 02 – Arquitetura geral dos microcontroladores.

A arquitetura é a forma como estão organizadas as partes internas de um chip. Essas partes internas possuem funções que são utilizadas para diversas tarefas (Souza, 2003; Pereira, 2004; Exsto Tecnologia, 2003).

A memória de programa é o local onde são armazenadas as instruções que o microcontrolador deve executar, ou seja, as linhas de programa que foram digitadas e compilados em um microcomputador (PC). A memória de dados é o local onde são armazenados dados que o programa em execução tem a possibilidade de escrever ou ler sempre que necessário (Souza, 2003; Pereira, 2004).

A ULA é responsável por todos os cálculos e a lógica matemática para a tomada de decisão das tarefas a serem realizadas (Souza, 2003; Pereira, 2004).

Os I/O's são os considerados "braços" dos microcontroladores, onde, por meio deles, conseguimos enviar e receber dados e informações do chip, bem como controlar dispositivos externos. Em outras palavras, são os caminhos que fazem a interligação do microcontrolador com o mundo externo (Souza, 2003; Pereira, 2004).

Os periféricos são circuitos que permitem ao microcontrolador realizar controle de dispositivos, tais como: portas de conversão analógico/digital, timers para a temporização de operações, timer para evitar travamentos (Watchdog)

reiniciando a CPU ao ocorrer um surto, portas para comunicação serial (USART's), portas I²C para interligar memória externa, outros microcontroladores e osciladores (Souza, 2003; Pereira, 2004).

A CPU, conhecida como unidade central de processamento, é responsável por todo o processamento de dados da unidade, onde interpreta os comandos e ativa os dispositivos de entrada e saída do microcontrolador (Souza, 2003; Pereira, 2004).

Estes dispositivos, diferente dos outros tipos de componentes eletrônicos dedicados, precisa de um conhecimento avançado de programação, pois são dispositivos programáveis, e, sem o programa interno, o microcontrolador é um componente sem função (Souza, 2003; Pereira, 2004).

Para se fazer uso deste recurso é essencial que o usuário tenha um projeto para execução e desenvolvimento, pois existem inúmeros tipos, modelos e marcas disponíveis no mercado que atendem com melhor custo/benefício (Souza, 2003; Pereira, 2004; Exsto Tecnologia, 2003).

Dentre os mais famosos, podemos citar a série de PIC da Microchip (www.microchip.com), AVR da ATMEL (www.atmel.com), Basic Step da Tato Equipamentos (www.tato.com.br), entre outros (Souza, 2003; Pereira, 2004; Rueda, 2005), (Quadro 01).

Quadro 01 – Microcontroladores encontrados no mercado.

Microcontrolador	Fabricante
Família 8051	Intel
PIC	Microchip
AVR	Atmel
Basic Stemp	Parallax
Basic Step	Tato Equipamentos

Fonte: Rueda (2005)

A programação de um microcontrolador exige que o usuário tenha um PC, porta de comunicação livre no PC, dispositivo de gravação, CHIP e softwares específicos (Souza, 2003; Pereira, 2004; Exsto Tecnologia, 2003).

A Figura 03 ilustra um esquema de procedimento básico para programação e utilização de microcontroladores.

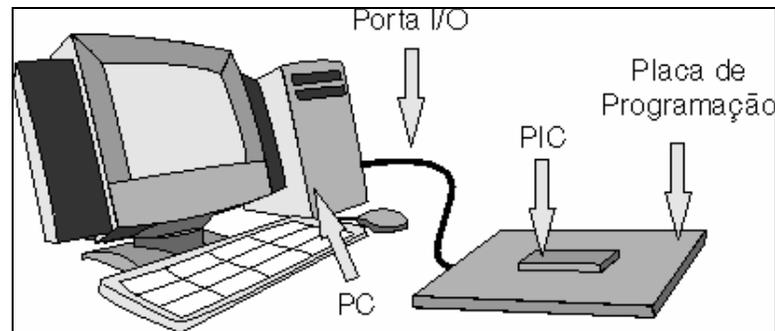


Figura 03 – Procedimento básico para programação e utilização de microcontroladores (<http://www.mecatronicafacil.com.br/>).

O PC é o microcomputador de uso doméstico, com uma porta de comunicação livre, contendo softwares de programação que gerem códigos hexadecimais ou linguagem de máquina (Souza, 2003; Pereira, 2004).

O dispositivo de gravação é um equipamento específico utilizado para inserir o código hexadecimal implementado no PC, dentro do microcontrolador (Souza, 2003; Pereira, 2004; Exsto Tecnologia, 2003).

Normalmente, o dispositivo é conectado a porta de entrada-saída do microcomputador. Tais portas podem ser paralela, serial ou USB (Universal Serial Bus). Neste caso, foi utilizado gravador de microcontrolador utilizando a porta USB.

Os microcontroladores podem ser vistos em várias aplicações, tais como: CLP (controladores lógicos programáveis), celulares, robôs industriais, processos de automação, eletrônica automotiva, equipamentos agrícolas, entre outros (Souza, 2003; Exsto Tecnologia, 2003).

2.5. Redes Neurais Artificiais (RNA's)

As redes neurais artificiais (RNA's) têm sido aplicadas na solução de uma infinidade de problemas. O adjetivo “neural” é usado porque muito da inspiração de tais redes vem da neurociência (Hertz et al., 1991). As RNA's empregam como unidade de processamento fundamental o neurônio artificial, inspirado no funcionamento básico dos neurônios biológicos (Tinós, 1999).

Recentes avanços em neurofisiologia têm desvendado vários mecanismos sobre o fluxo e o processamento de informações que ocorrem no cérebro humano. Alguns desses mecanismos foram modelados matematicamente,

permitindo a elaboração de algoritmos computacionais que simulam, ainda que de modo simplificado, a mais básica das estruturas cerebrais: o neurônio (Bueno, 2006).

O cérebro humano é responsável pelo que se chama de emoção, pensamento, percepção e cognição, assim como a execução de funções sensoriomotoras e autônomas. Os neurônios são divididos em três seções: corpo da célula, dendritos e o axônio. Os dendritos têm a função de receber as informações ou impulsos nervosos oriundos de outros neurônios e conduzir os sinais via axônio até o corpo celular. O ponto de contato do axônio e os dendritos são chamados de sinapse. As sinapses funcionam como válvulas e são capazes de controlar a transmissão de impulsos, ou seja, fluxo de informação entre os nodos na rede neural (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

As RNA's tentam reproduzir as funções das redes biológicas, buscando implementar seu comportamento básico e sua dinâmica. No entanto, do ponto de vista físico, as redes artificiais se diferem bastante das redes biológicas. Como características comuns, pode-se citar que os dois sistemas são baseados em unidades de computação paralela e distribuída que se intercomunicam por meio de conexões sinápticas. Apesar da pouca similaridade, do ponto de vista biológico entre os dois sistemas, estas características comuns permitem às RNA's reproduzir com fidelidade várias funções somente encontradas nos seres humanos (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

Assim, as RNA's são sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples (nodos) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos, os quais, após o processo de aprendizagem, armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. O funcionamento dessas redes é inspirado numa estrutura biológica concebida pela natureza: o cérebro humano (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

O modelo artificial de um neurônio biológico foi fruto do trabalho pioneiro de Warren McCulloch (Psiquiatra e Neuroanatomista) e Walter Pitts (matemático) em

1943, sendo representado por [MCP43]. Esses autores apresentam uma discussão sofisticada de redes lógicas de nodos (nodos MCP) e novas idéias de máquinas de estados finitos, elementos de decisão de limiar lineares e representações lógicas de várias formas de comportamento e memória. Parte da discussão gira em torno dos métodos de aprendizado para que os nodos possam ser capazes de executar uma determinada função. O trabalho se concentra muito mais em descrever um modelo artificial de um neurônio e apresentar as capacidades computacionais do que apresentar técnicas de aprendizado (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

O aprendizado de redes biológicas e artificiais veio a ser objeto de estudo anos depois com o trabalho de Donald Hebb, sendo representado por [Heb49]. Esse autor apresentou como a plasticidade da aprendizagem de redes neurais é conseguida através da variação dos pesos de entrada dos nodos. Propôs uma teoria para explicar o aprendizado em nodos biológicos baseado no esforço das ligações sinápticas entre os nodos excitados. Essa teoria foi interpretada do ponto de vista matemático e hoje é utilizada em vários algoritmos de aprendizado. Mais tarde, Widrow e Hoff sugeriram uma regra de aprendizado conhecida como Widrow-Hoff ou regra delta, que ainda é bastante utilizada. Essa regra é baseada no método do gradiente para minimização do erro na saída de um neurônio com resposta linear (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

Em 1958, Frank Rosenblatt [Ros58] demonstrou, com seu novo modelo, o perceptron, que, se fossem acrescentadas sinapses ajustáveis, a RNA com nodos MCP poderiam ser treinadas para classificar certos tipos de padrões. Esse autor descreveu uma topologia de RNA com estruturas de ligação entre os nodos e, o mais importante, propôs um algoritmo para treinar a rede para executar determinados tipos de funções (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

O perceptron simples descrito por Rosenblatt possui três camadas: a primeira camada recebe as entradas do exterior e possui conexões fixas (retina); a segunda camada recebe impulsos da primeira através de conexões cuja eficiência de transmissão (peso) é ajustável e, por sua vez, envia as saídas para a terceira camada (resposta). Este tipo elementar de perceptron comporta-se como classificador de padrões, dividindo o espaço de entrada em regiões distintas para

cada uma das classes existentes. Inicialmente, a saída da rede é aleatória, mas, pelo ajuste gradual dos pesos, o perceptron é treinado para fornecer saídas de acordo com os dados do conjunto de treinamento (Braga et al., 2000; Haykin, 2001, Kovács et al., 2002, Bueno, 2006).

Em 1969, Minsky e Papert [MP69], chamaram atenção para algumas tarefas que o perceptron não era capaz de executar, já que este só resolve problemas linearmente separáveis, ou seja, problemas cuja solução pode ser obtida dividindo-se o espaço de entrada em duas regiões através de uma reta. O perceptron, por exemplo, não conseguem detectar paridade, conectividade e simetria, que são problema não lineares separáveis. Estes são exemplos de “problemas difíceis de aprender” (hard learning problems). Problemas difíceis de aprender formam uma classe grande de funções que não pode ser desprezada. O principal argumento desses autores era de que o problema do crescimento explosivo, tanto de espaço ocupado como do tempo requerido para a solução de problema complexos, afetaria as RNA's, inclusive os perceptrons (Braga et al., 2000, Haykin, 2001, Kovács et al., 2002, Bueno, 2006).

Em 1982, John Hopfield [Hop82] chamou a atenção para as propriedades associativas das RNA's. O grande feito desse autor foi, sem dúvida, mostrar a relação entre as redes recorrentes auto-associativas e sistemas físicos, o que abriu espaço para a utilização de teorias correntes da Física para estudar tais modelos (Braga et al., 2000, Haykin, 2001, Kovács et al., 2002).

A solução de problemas através de RNA's é bastante eficiente, já que a forma como estes são representados internamente pela rede e o paralelismo natural inerente à arquitetura das RNA's criam possibilidade de um desempenho superior ao dos modelos convencionais (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

Em RNA, o procedimento usual na solução de problemas passa inicialmente por uma fase de aprendizagem, em que um conjunto de exemplos é apresentado para a rede, a qual extrai automaticamente as características necessárias para representar a informação fornecida. Estas características são utilizadas posteriormente para gerar respostas para o problema. A capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar a informação aprendida é, sem dúvida, o atrativo principal da solução de problemas através das RNA's (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

O modelo de neurônio proposto por McCulloch e Pitts [MCP43] é uma simplificação do que se sabia a respeito do neurônio biológico. Sua descrição matemática resultou em um modelo de n terminais de entrada x_1, x_2, \dots, x_n (que representam os dendritos) e apenas um terminal de saída y (representando o axônio). Para emular os comportamentos das sinapses, os terminais de entrada dos neurônios têm pesos acoplados w_1, w_2, \dots, w_n , cujos valores podem ser positivos ou negativos, dependendo de as sinapses correspondentes serem inibitórias ou excitatórias. O efeito de uma sinapse particular i no neurônio pós-sináptico é dado por $x_i w_i$. Os pesos determinam em que grau o neurônio deve considerar sinais de disparo que ocorrem naquela conexão, (Figura 04), (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Bueno, 2006).

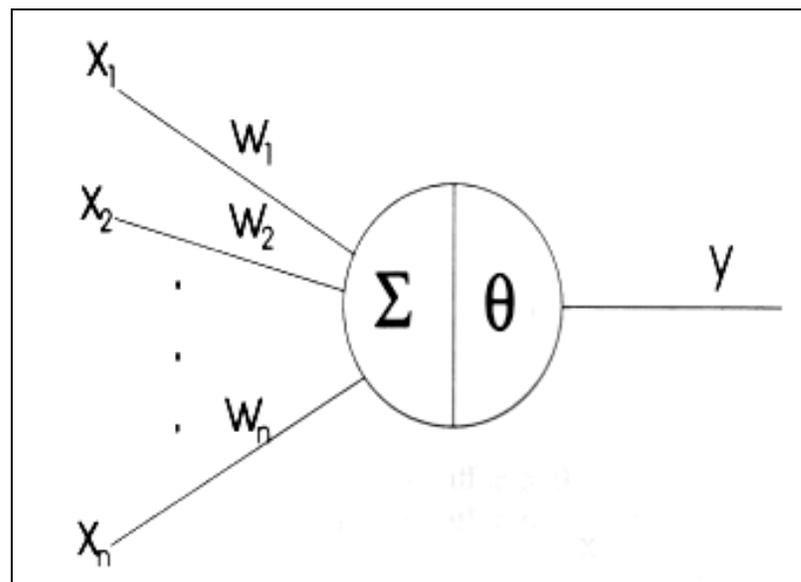


Figura 04 – Pesos e sinais de disparo que ocorrem na conexão.

Um neurônio biológico dispara quando a soma dos impulsos que ele recebe ultrapassa o limiar de excitação (*threshold*). O corpo do neurônio é emulado por um mecanismo simples que faz a soma ponderada dos valores $x_i w_i$ recebido pelo neurônio e decide se o deve ou não disparar (0 ou 1), comparando a soma obtida ao limiar ou *threshold* do neurônio (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Tinós, 1999; Bueno, 2006).

No modelo MCP, a ativação do neurônio é obtida através de uma “função de ativação”, que ativa ou não a saída, dependendo da soma ponderada das suas

entradas. A função de ativação é dada pela função de limiar descrita na Equação 01. O nodo MCP terá a saída ativa quando:

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \geq \theta \quad (01)$$

Onde n é o número de entradas, w_i é o peso associado à entrada x_i e θ é o limiar do neurônio (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Tinós, 1999; Bueno, 2006).

A partir do modelo de McCulloch e Pitts, foram derivados vários outros modelos que permitem a produção de uma saída qualquer, e com diferentes funções de ativação, (Figura 05). São elas: linear (a), passo (b) ou rampa (c) e sigmoidal ou S-Shape (d), (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Tinós, 1999; Bueno, 2006).

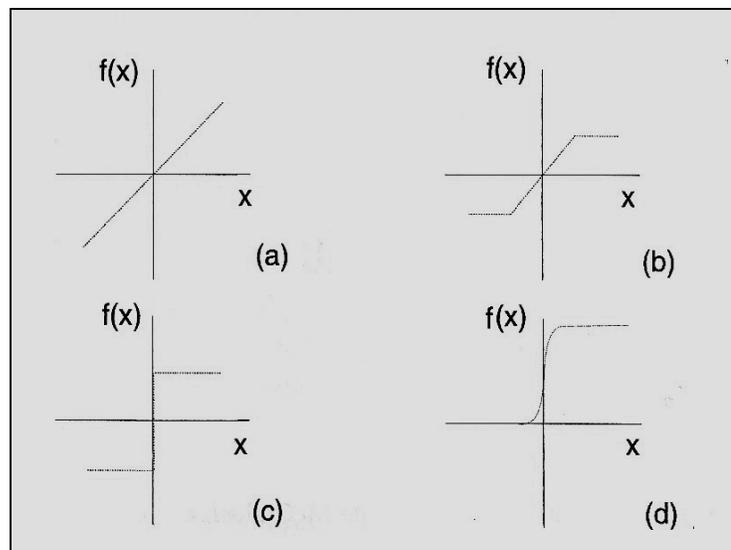


Figura 05 – Exemplos de funções de ativação: (a) linear, (b) rampa, (c) passo e (d) sigmoidal ou S-Shape.

A maneira pela qual os neurônios de uma rede neural estão estruturados está intimamente ligada com o algoritmo de aprendizagem usado para treinar a rede. Em uma rede neural em camadas, os neurônios estão organizados na forma de camadas (Haykin, 2001; Tinós, 1999).

As camadas são definidas como camada única, múltiplas camadas ou recorrentes (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Bueno, 2006). A rede em camada única é a mais simples, onde uma camada de entrada de nós de fonte se projeta

a uma camada de neurônio de saída. A rede em múltiplas camadas distingue da primeira pelo fato da presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nós computacionais são chamados de neurônios ocultos. E a rede recorrente diferencia das anteriores por ter pelo menos um laço de realimentação, esta pode ser de única camada ou múltiplas camadas com neurônios ocultos, conforme apresentado na Figura 6 (Haykin, 2001).

Os nodos podem ter conexões do tipo feedforward ou acíclica, onde a saída de um neurônio na i -ésima camada da rede não pode ser usada como a entrada de nodos anteriores; esta configuração é mostrada na Figura 6 (a), (b) e (c). O tipo feedback ou cíclica, onde a saída de algum neurônio da i -ésima camada da rede pode ser usada como a entrada de nodos anteriores; esta configuração é mostrada na Figura 06 (d) e (e) (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Bueno, 2006).

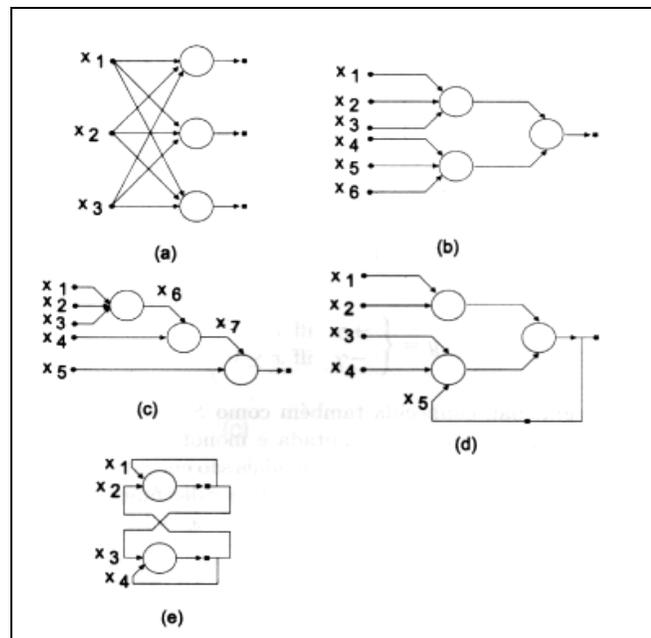


Figura 06 – Exemplos de arquiteturas de RNA's: (a) camada única, (b) e (c) múltiplas camadas, (d) e (e) redes recorrentes; (a), (b) e (c) feedforward, (d) e (e) feedback.

A aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros de uma rede são ajustados através de uma forma continuada de estímulo pelo ambiente no qual a rede está operando (Braga et al., 2000; Bueno, 2006).

Diversos métodos de treinamento de redes foram desenvolvidos podendo ser agrupados em dois paradigmas principais: aprendizado supervisionado e não supervisionado (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Oliveira, 2007).

O método supervisionado é o mais comum no treinamento das RNA's, sendo assim denominado pelo fato de as entradas e saídas desejadas serem fornecidas para a rede por meio de um supervisor externo. Tem como resultado o ajuste dos parâmetros da rede, de forma a encontrar uma ligação entre os pares de entrada e saída. A rede tem sua saída corrente comparada com a saída desejada, recebendo informações do supervisor sobre o erro da resposta atual, e a cada padrão de entrada a rede compara a resposta desejada ajustando-se os pesos das conexões para minimizar o erro (Braga et al., 2000).

O MLP com backpropagation é o exemplo mais bem sucedido de uma rede neural, com a maioria das aplicações industriais (exemplo: controle e robótica) implementando esta arquitetura, a despeito de haver um grande número alternativo de arquiteturas (AZOFF, 1994).

Os exemplos mais conhecidos são; regra delta [WH60] e a sua generalização para redes de múltiplas camadas conhecido como backpropagation [RHW86] (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002; Oliveira, 2007).

No aprendizado não supervisionado não há um supervisor para acompanhar o processo de aprendizado. Para este tipo de aprendizado, existem apenas os padrões de entrada. A rede inicialmente estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada dos dados, desenvolvendo-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Isto é possível somente quando existe redundância nos dados de entrada para que a rede encontre quaisquer padrões ou características desses dados (Braga et al., 2000). Os exemplos mais comuns são: feedforward de camada única e feedforward de múltiplas camadas, onde o processo de aprendizado consiste em modificar repetidamente o peso sináptico de todas as conexões dos sistemas em resposta às entradas (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002).

Quando uma rede neural artificial é implementada, isso não significa que ela terá 100% de acerto nas situações em que trabalha. Este foi e continua sendo motivo de pesquisas e certamente terá ainda muitas inovações. O sonho de se ter uma máquina tão poderosa quanto o cérebro humano é o que certamente

idealizou este assunto, mas ainda há muito trabalho a ser feito (Braga et al., 2000; Haykin, 2001; Kovács et al., 2002).

Haykin (2001) destacou um problema comum ocorrido na aprendizagem por retropropagação para calcular os pesos sinápticos de um perceptron de múltiplas camadas.

A generalização na rede neural é inicialmente estabelecida a partir de uma fase de treinamento, onde entradas de exemplo são apresentadas à rede que é treinada para extrair informações relevantes desses padrões. Subseqüentemente, a rede tem a capacidade de generalizar, ou seja, uma entrada ainda não vista e não utilizada também poderá ser processada (Oliveira, 2007).

Uma RNA projetada para generalizar bem produzirá um mapeamento de entrada-saída correto, mesmo que a entrada seja relativamente diferente dos exemplos usados para treinar a rede (Figura 07).

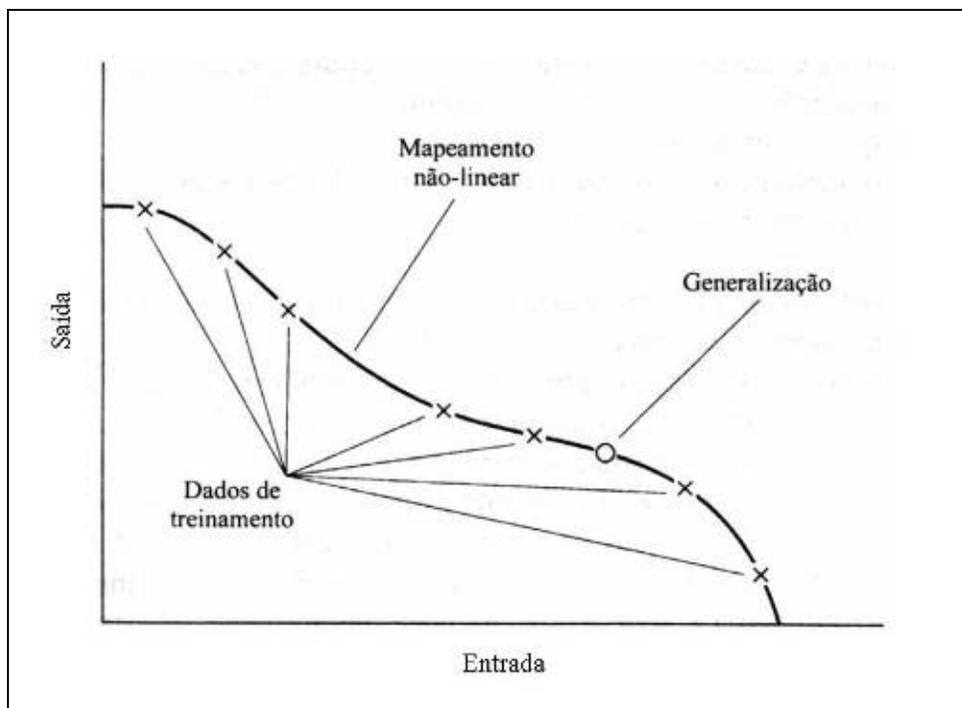


Figura 07 – Dados ajustados adequadamente (boa generalização).

Entretanto, quando uma rede é treinada em excesso, essa pode acabar perdendo a habilidade de generalizar entre padrões de entrada-saída similares, (Figura 08) (Haykin, 2001; Oliveira, 2007).

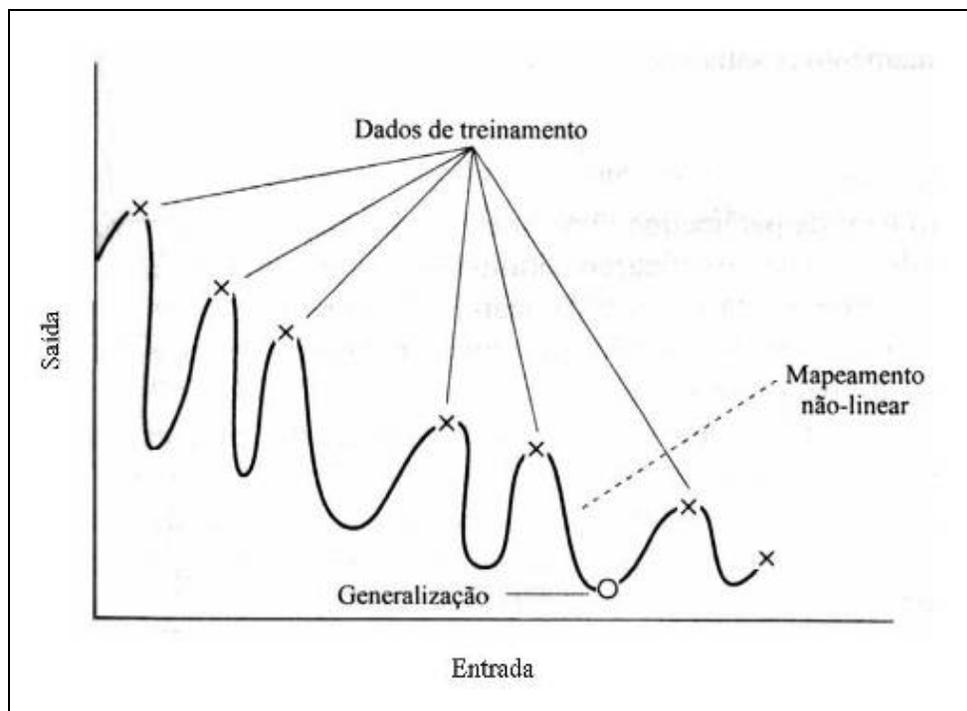


Figura 08 – Dados ajustados em excesso (generalização pobre).

Por curiosidade, as RNA's podem ser aplicadas para resolver uma grande quantidade de problemas. Um bom exemplo de aplicação são softwares de reconhecimento de voz, que precisam aprender a conhecer a voz de determinadas pessoas; robôs que desarmam bombas e fazem serviços gerais; scanner para extração de textos a partir de figuras, os quais são para reconhecer caracteres da imagem, entre outros.

2.6. ETo e Redes Neurais Artificiais (RNA's)

Atualmente as RNA's estão presentes em diversas áreas, como citadas anteriormente. Entretanto, na agricultura, essa ferramenta está sendo inserida significativamente, por vários pesquisadores de diversas áreas (Pacheco et al., 2004; Varella et al., 2002; Stammer, 2006).

Vários pesquisadores realizaram trabalhos utilizando RNA's com a finalidade de estimar a evapotranspiração em função de elementos climáticos (Odhiambo et al., 2001; Kumar et al., 2002; Silva, 2002; Sudheer et al., 2003; Trajkovic et al., 2003; Arca et al., 2004 e Zanetti et al., 2007). Estes encontraram resultados satisfatórios, inclusive melhores do que os obtidos com o método

convencional de Penman-Monteith (Kumar et al., 2002), citado por Zanetti et al., 2008.

Embora tenham conseguido bons resultados, os autores que utilizaram RNA's para estimar a ETo, com exceção de Sudheer et al. (2003), Arca et al. (2004) e Zanetti et al. (2007), não se empenharam em simplificar as variáveis de entrada, utilizando, em vários trabalhos, os mesmos dados climáticos requeridos para aplicação do método de Penman-Monteith, Zanetti et al., 2007 e 2008, conforme apresentado no Quadro 02.

Quadro 02 – Dados de entrada propostos para estimação da ETo usando redes neurais artificiais.

Autor	Dados de entrada
Odhiambo et al., 2001	- Radiação solar, diferença entre a temperatura máxima e mínima diária, umidade relativa do ar e velocidade do vento.
Kumar et al., 2002	- Radiação solar, temperatura máxima e mínima, umidade relativa máxima e mínima e velocidade do vento.
Silva, 2002	- Não revelou.
Sudheer et al., 2003	- Média da temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e duração do brilho solar. - Média da temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. - Média da temperatura.
Trajkovic et al., 2003	- Temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e duração do brilho solar.
Arca et al. 2004	- Combinação da ETo estimada por Hargreaves, Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle, deficit de pressão de vapor, velocidade do vento, radiação solar extraterrestre e temperatura.
Zanetti et al., 2007	- Temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar extraterrestre e fotoperíodo máximo diário.
Zanetti et al., 2008	- Latitude, longitude, altitude, temperatura média do ar, amplitude térmica e dia do ano.

Sudheer et al. (2003) utilizaram três opções de dados de entrada para estimar a ETo, a partir de dados de temperatura média, umidade relativa, velocidade do vento, e duração do brilho solar. Na opção mais simplificada, a ETo foi estimada em função apenas da temperatura média do ar e da data correspondente à sua ocorrência.

Arca et al. (2004) testaram onze combinações dos seguintes dados de entrada: ETo estimada pelo método de Hargreaves, Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle, déficit de saturação de vapor, velocidade do vento, radiação solar extraterrestre e temperatura do ar. Na combinação mais simplificada, a ETo foi

estimada em função de duas variáveis: radiação solar extraterrestre e temperatura do ar.

Zanetti et al. (2007) desenvolveram uma rede neural artificial para estimar a ETo em função das temperaturas máxima e mínima do ar em Campos dos Goytacazes, RJ. A rede foi configurada com uma camada de entrada (com quatro variáveis), uma camada intermediária (com 10 neurônios) e uma camada de saída (com um neurônio), conforme a Figura 09. Os pesquisadores concluíram que, levando em consideração apenas as temperaturas máxima e mínima do ar, pode-se estimar a ETo (valores diários e médios de 3, 7, 15 e 30 dias).

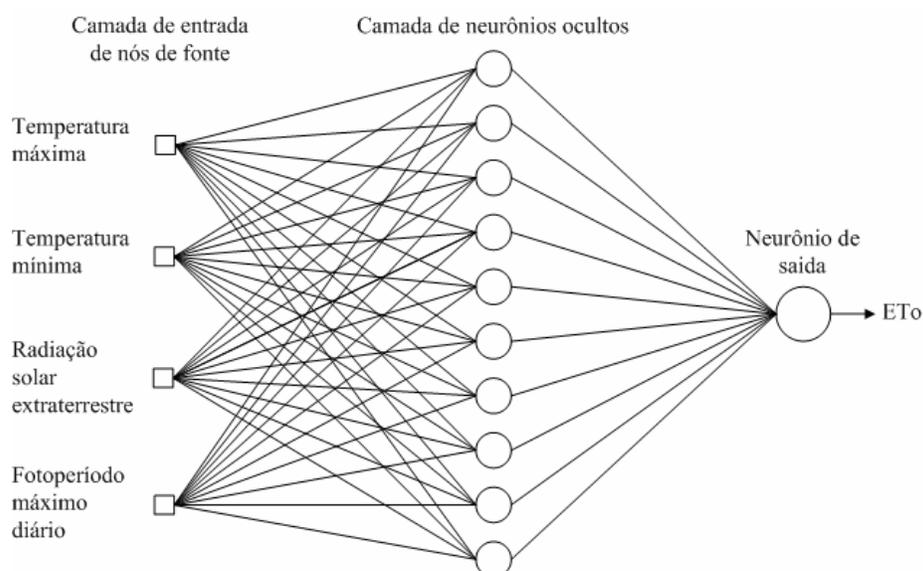


Figura 09 – RNA desenvolvida por Zanetti et al. (2007).

Como variáveis de entrada para a RNA foram adotadas as temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), a radiação solar extraterrestre ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) e a duração máxima de insolação diária (horas). Estas duas últimas foram calculadas em função da latitude local e da data juliana, conforme as equações apresentadas por Allen et al. (1998).

Todos os neurônios presentes na RNA utilizada foram configurados baseando-se no modelo apresentado por Haykin (2001), Figura 10.

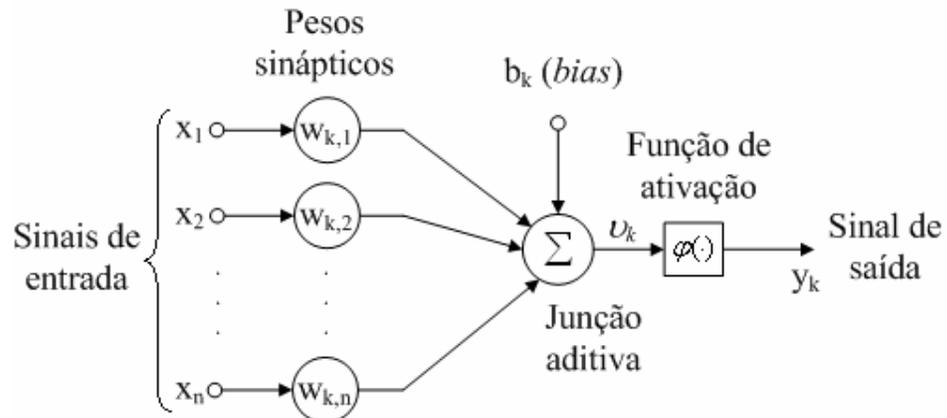


Figura 10 – Detalhe dos neurônios de saída do modelo não linear utilizados por Zanetti et al. (2007).

Nos pesos sinápticos ($w_{k,j}$) o índice k se refere ao neurônio em questão, enquanto o índice j se refere ao sinal de entrada da sinapse à qual o peso se refere.

A junção aditiva possui o propósito de somar todos os sinais de entrada (x_j) ponderados pelos pesos sinápticos de cada neurônio. O bias tem o papel de aumentar ou diminuir a influência do valor da entrada líquida para a ativação do neurônio. Já a função de ativação funciona restringindo a amplitude de saída de um determinado neurônio e adicionando não-linearidade no modelo.

Para os neurônios da camada oculta foi adotada a função de ativação sigmóide logística, Equação 02.

$$\varphi(v) = \frac{2}{1 + \exp(-2 \cdot v)} - 1 \quad (02)$$

Matematicamente, o neurônio apresentado na Figura 10 pode ser descrito pelas Equações 03, 04 e 05:

$$u_k = \sum_{j=1}^n w_{k,j} \cdot x_j \quad (03)$$

$$v_k = u_k + b_k \quad (04)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (05)$$

Em que, u_k é a saída do combinador linear (junção aditiva); $w_{(k,1)}$, $w_{(k,2)}$, ..., $w_{(k,n)}$ são os pesos sinápticos; x_1, x_2, \dots, x_n são os sinais de entrada; v_k é o potencial de ativação; b é o bias; y_k é o sinal de saída do neurônio k , e φ é a função de ativação. No neurônio de saída da rede a ETo corresponde ao seu respectivo sinal y_k .

O modelo proposto por Zanetti et al. (2007), diferentemente dos modelos propostos por outros autores, necessita somente de registros diários das temperaturas máxima e mínima do ar para a estimação da ETo. Por ter apresentado desempenho satisfatório para estimar a ETo, utilizou-se no protótipo a RNA ajustada por Zanetti et al. (2007).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da Área

O experimento foi conduzido na estação evapotranspirométrica do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Latitude $21^{\circ}44'47''\text{S}$, Longitude $41^{\circ}18'24''\text{W}$, Altitude 11 m, localizada na estação experimental PESAGRO-RIO, no município de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

Na estação experimental encontra-se instalada uma estação meteorológica automática (DL-15, marca: Adolf Thies e modelo: Thies Clima, UK) composta por sensores de temperatura e umidade relativa do ar, temperatura do solo, radiação solar, velocidade e direção do vento e chuva em um ambiente cercado com grama batatais em crescimento ativo com altura aproximada de 15 cm (Figura 11).



Figura 11 – Vista parcial da área experimental PESAGRO-RIO.

O protótipo ficou instalado neste local no período de 18 de abril a 26 de junho de 2007. Neste período o índice pluviométrico foi aproximadamente de 190 mm.

3.2. Caracterização Local

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como Aw, isto é, clima tropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco. A temperatura média anual está em torno de 24 °C, sendo a amplitude térmica muito pequena, com a temperatura média do mês mais frio em torno de 21 °C. A precipitação pluviométrica anual média é 1.023 mm (Daher et al., 2002; Mendonça et al., 2007).

3.3. Protótipo do Equipamento

Para o desenvolvimento do protótipo foi utilizado um microcontrolador (PIC-18F452, Microchip-TM, USA), display de LCD (*Liquid Cristal Display*), sensor de

temperatura (LM-35, National Semiconductors-TM, USA), memória (I²C, Microchip-TM, USA), comunicador serial (RS-232, MAXIM, USA), botões, caixa plástica de circuito, placa de fenolite, fios, cabos, parafusos, porcas, hastes, braçadeiras, abrigo para sensor confeccionado com discos de alumínio cru e outros componentes adicionais. Para o sensor de precipitação pluvial, foi utilizado pluviômetro de conchas da Davis Rain Collector II (USA), que mede a lâmina precipitada com precisão de 0,2 mm.

A Figura 12 mostra o protótipo instalado em campo, com a altura total de 2 m, da superfície do solo até o abrigo de sensor de temperatura; e o pluviômetro, com altura total de 1,5 m da superfície do solo até a borda.



Figura 12 – Protótipo instalado em campo, com abrigo de sensor de temperatura, painel coletor de energia solar, caixa hermeticamente fechada com sistema eletrônico, pluviômetro eletrônico e as hastes de tubo galvanizado.

3.3.2. Microcontrolador

O microcontrolador PIC-18F452 é um chip de baixo custo com uma série de funções semelhantes a um microcomputador de tamanho reduzido. Nele está contido uma unidade lógica aritmética (ALU - processador), oscilador interno e externo, memória ROM, memória RAM, memória EEPROM, conversores analógico digital de 10 bits, portas de comunicação serial, portas I/O (digitais e analógicas), *timers* (relógio), contadores e outras funções específicas (Pereira, 2004)(Figura 13 e 14).



Figura 13 – Microcontrolador PIC-18F452 da marca MICROCHIP-TM.

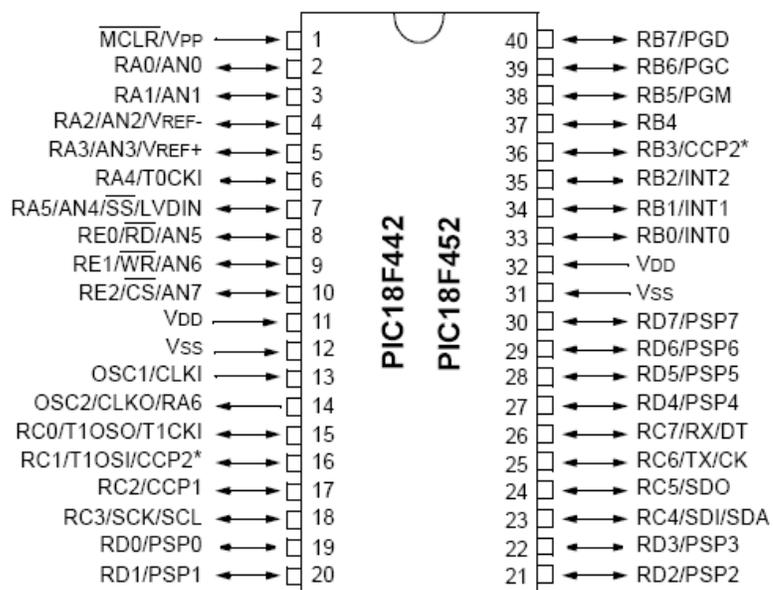


Figura 14 – Microcontrolador PIC-18F452 com identificação geral dos pinos e as respectivas funções.

A linguagem de programação básica de todos os microcontroladores, independentemente da marca, é o assembler (*assembly*), de baixo nível ou linguagem de máquina. Neste caso, a programação interna utilizada foi baseada

na linguagem “C”, específica para microcontrolador da série PIC-Microchip, com compilador CCS-C PCW[®] (Custom Computer Services, USA) que converte a programação anterior em linguagem de máquina.

Após compilar o código fonte do programa, foi utilizado o gravador de microcontrolador da marca MOSAICO ICD-2 USB, conectado com o software Microchip MpLab 7.0 (Microchip, USA). Através dese gravador, juntamente com o software MpLab, foi inserido o código, convertido em linguagem de máquina, para o PIC-18F452 executar as tarefas pré-determinadas.

3.3.3. Módulo display LCD

Os módulos de display LCD são componentes de alto desempenho e praticidade para apresentar informações internas de um dispositivo microcontrolado, pois sem esse as informações contidas somente poderão ser vistas por meio de um microcomputador (Pereira, 2004).

Existem dois tipos de módulos LCD: os caracteres e os gráficos. Os módulos caracteres são capazes de apresentar somente caracteres como letras, números e símbolos, e tem seu custo reduzido e fácil de programar. Os módulos gráficos podem apresentar virtualmente qualquer tipo de informação na tela, podendo ser desde os caracteres até uma animação. Estes têm o seu custo um pouco alto e a programação é mais complexa (Figura 15).

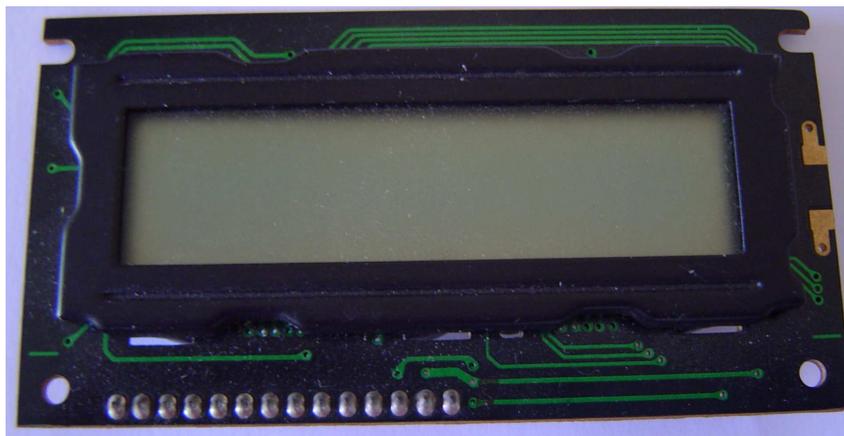


Figura 15 – Módulo de display de LCD.

O módulo que foi utilizado é o tipo gráfico, onde as informações são

mostradas em forma de linha e colunas, pelo auxílio de um controlador HD44780 MITSUI/HITACHI-TM, padrão para este tipo de módulo. Esses controladores permitem uma interface simples com sistemas microcontrolados, permitindo a comunicação selecionável de 4 ou 8 bits, pelos pinos D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6 e D7, e com auxílio de três linhas de sinalização pelos pinos EENABLE, RS e R/W. No modo 4 bits, utilizam-se os pinos D4 ao D7 e, no modo 8 bits, utilizam-se os pinos D0 ao D7.

Todos os comandos e funções estão ligados ao conjunto de 8 bits enviados pelo microcontrolador, que será decodificado pela interface do módulo LCD (HD44780), apresentando o tal comando e a função na tela (Figura 16).

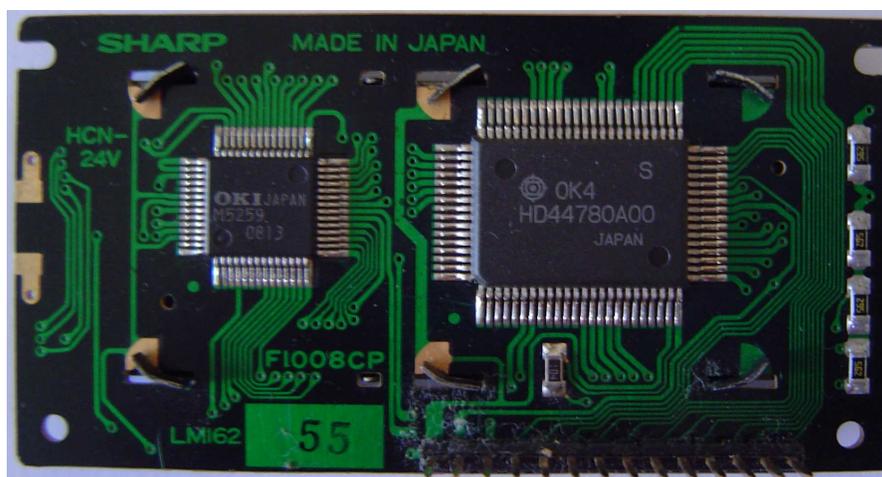


Figura 16 – Controlador HD44780 do módulo de display LCD.

3.3.4. Sensor de temperatura

O sensor para monitorar a temperatura do ambiente foi o LM-35, da marca National Semiconductors-TM, que é um sensor de baixo custo e alta precisão (0,1°C). Esse sensor opera em uma faixa de 0 a 100 °C (invólucro TO-92, Plastic Package, USA), com escala linear de saída do sinal elétrico. O LM-35 tem desempenho comparável aos sensores de temperatura de estações convencionais e os de estações meteorológicas automáticas (Sugawara, 2003), Figura 17.

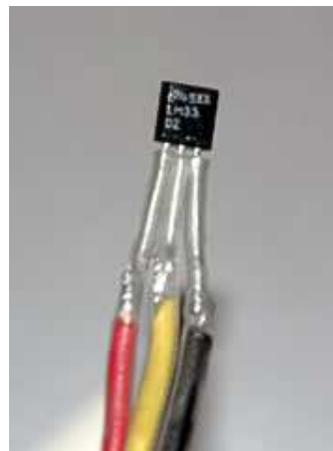
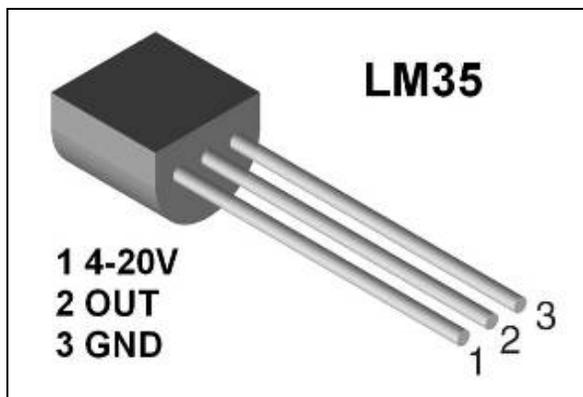


Figura 17 – Sensor de temperatura LM-35 da National Semiconductors.

A base física de funcionamento do sensor consiste na mudança da sua resistência ôhmica em função da variação da temperatura. Essa propriedade permite converter a variação da temperatura em variação do potencial elétrico nos terminais do sensor. Os potenciais elétricos variam de 0,0 V para 0 °C e 1,0 V para 100 °C. Existem formas diferentes de configuração que torna esse sensor capaz de medir temperaturas negativas.

Esse sensor, por ter uma saída de sinal analógico, foi ligado em uma porta analógico/digital do microcontrolador.

Para a fixação do sensor foi confeccionado um invólucro de resina acrílica, que dará forma ao sensor e o tornará impermeabilizado.

3.3.5. Sensor de precipitação pluvial

O sensor de precipitação pluvial utilizado foi o pluviômetro eletrônico Rain Collector II (Davis USA, fornecido pela Spectrum Technologies, USA). Esse tem um diâmetro de 20,5 cm, e quantifica a lâmina de chuva por meio de pulsos elétricos com a precisão de 0,2 mm, (Figura 18).



Figura 18 – Sensor de precipitação pluvial eletrônico Rain Collector II.

Esse sensor, por ter uma saída de sinal digital, foi ligado diretamente a uma porta digital do microcontrolador, onde cada pulso recebido indica uma lâmina de 0,2 mm de chuva.

3.3.6. Descrição do Circuito

O esquema eletrônico implementado teve como entrada de dados a temperatura do ar e a precipitação. Um teclado e um display de LCD foram utilizados para a interação do equipamento com o usuário. A memória foi utilizada para auxiliar o microcontrolador nos cálculos e armazenar os dados. A porta serial permitiu a comunicação do microcontrolador com o computador para transferência de dados (Figura 19).

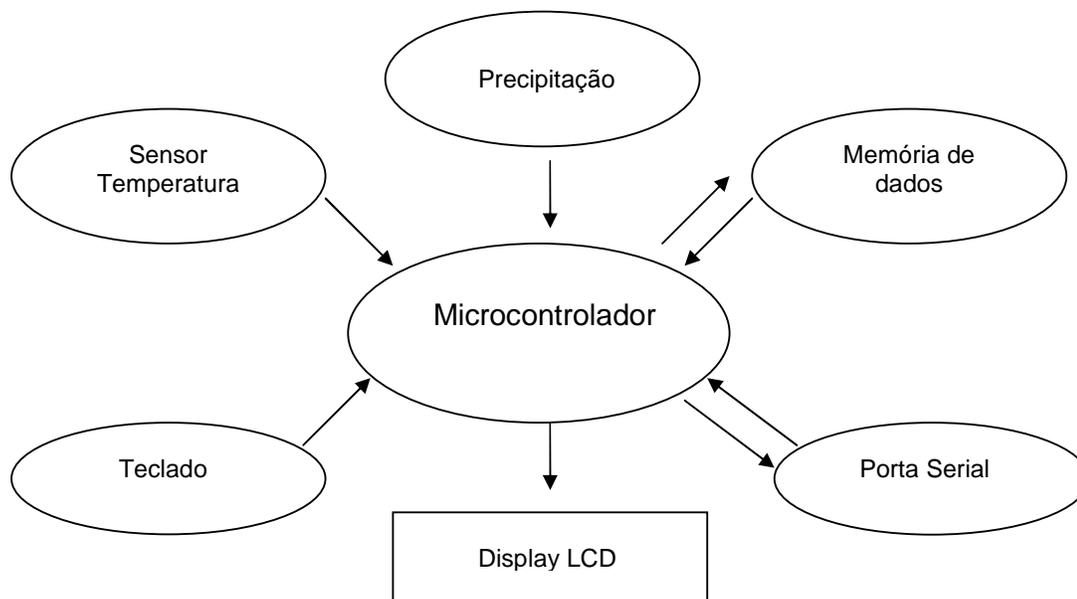


Figura 19 – Modelo simplificado do esquema eletrônico do protótipo com seus principais componentes (sensor de temperatura, sensor de pluviosidade, memória de dados, teclado, display de LCD, comunicador de dados serial e microcontrolador).

O microcontrolador foi alimentado pela tensão estabilizada de 5V (CC – corrente contínua), por meio de um regulador LM7805 da National Instruments-TM. Esse componente regula a tensão de saída constante a 5V, caso haja, em sua entrada, uma voltagem mínima de 2,5V acima da tensão de saída e, no máximo, 35V.

A tensão de alimentação foi ligada aos pinos 11, 12, 31, e 32 (VCC e VSS). Os pinos 12 e 31 para o negativo e 11 e 32 para o positivo. O pino 1 (MCLR) será ligado por meio de um resistor de 10 K Ω para o positivo.

O cristal quartzo ressonador utilizado foi de 4 MHz, que irá fornecer a contagem do tempo para cada instrução que será executada pela unidade lógica aritmética e processamento. Isto envolve também os contadores e o relógio interno. Esse foi conectado por meio de um arranjo paralelo aos pinos 13 e 14 (OSC1 e OSC2).

O sensor de temperatura foi conectado ao pino 2 (AN0), ou porta analógico/digital, que irá converter a voltagem em números binários e conversão em valores de temperatura.

O sensor de chuva foi conectado por meio de um circuito divisor de tensão (com resistor de 10 K Ω) ao pino 33 (RB0), ou porta digital de interrupção, que irá ler os pulsos 0 e 1 e os convertem em lâmina de precipitação.

O display de LCD foi conectado aos pinos 8, 9, 27, 28, 29 e 30 (RE0, RE1, RD4, RD5, RD6 e RD7). Os pinos 8 e 9 foram ligados aos pinos E e RS do LCD, respectivamente, e 27, 28, 29 e 30 nos pinos D4, D5, D6 e D7, respectivamente. Este tipo de ligação é conhecida como modo 4 bits, como foi comentado anteriormente.

O teclado foi conectado por meio de um circuito divisor de tensão (com resistor de 10 K Ω) ao pino 34, 35, 36, 37 e 38 (RB1, RB2, RB3, RB4 e RB5), ou portas digitais, que lê pulsos 0 e 1 e executa as sub-rotinas pré-estabelecidas.

A Figura 20 mostra os detalhes da placa mãe do protótipo, onde estão soldados os componentes eletrônicos na placa de fenolite.

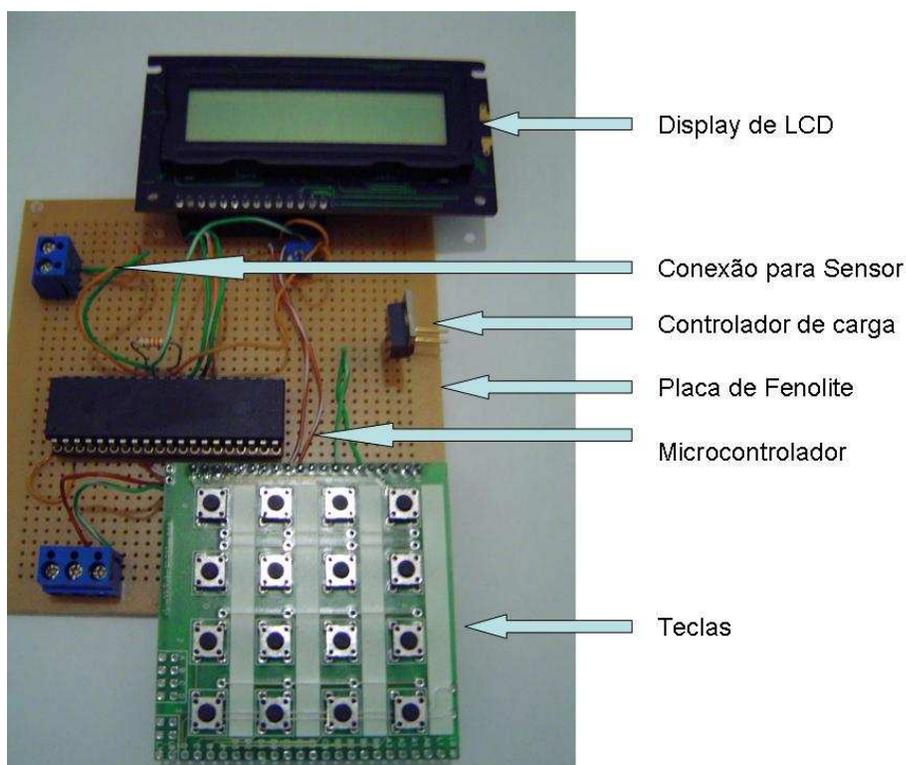


Figura 20 – Placa mãe do Protótipo com os detalhes dos componentes eletrônicos utilizados.

3.3.7. Descrição do Programa

A programação seguiu o mesmo fluxograma utilizado em outros programas compiladores, como mostra a Figura 21.

A programação foi feita com base em bibliotecas inerentes ao microcontrolador escolhido, fazendo com que o código ficasse mais enxuto e dinâmico. Essas bibliotecas podem ser criadas ou pode-se utilizar as que estão disponíveis no programa compilador. Neste caso, foram utilizadas as bibliotecas fornecidas pelo compilador CCS-C PCW e as criadas para resolver as equações cosmológicas, o modelo de RNA (Zanetti et al., 2007), e outras atribuições.

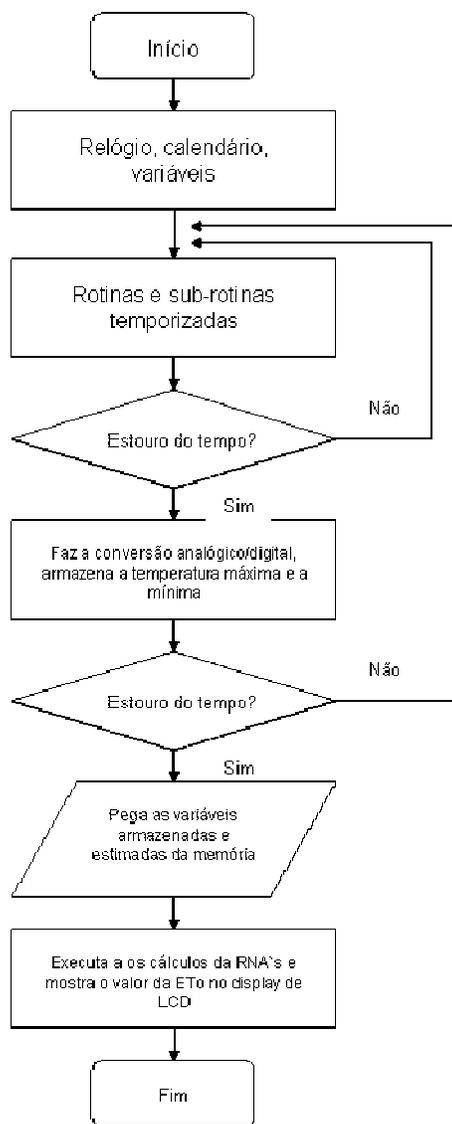


Figura 21 – Fluxograma utilizado na programação do microcontrolador.

A partir do momento em que o microcontrolador é alimentado, uma etapa de verificação é inicializada. Primeiro, o sistema verifica se há um sinal positivo ou 1 no pino MCLR antes de qualquer execução.

Verificado a operação anterior, inicia-se a execução das linhas de comando “main()”, verificando todas as configurações iniciais do dispositivo como ciclo do oscilador, tipo de timer, conversores, portas I/O, interrupções, variáveis constantes, entre outros.

Executado o “main()”, começa o processo de loop infinito, onde estão todos os comando para a chamada das sub-rotinas que executarão os processos como relógio, calendário, contador de tempo, comparadores, conversor da temperatura, conversor da chuva, cálculos de variáveis cosmológicas, execução da RNA e a ETo, conforme mostrado na Figura 20.

3.3.8. Abrigo meteorológico

Segundo Varejão Silva (2000), as medições de temperatura e umidade relativa do ar, de acordo com a OMM (Organização Meteorológica Mundial), devem ser feitas em abrigos meteorológicos, para evitar que a luz do sol incida diretamente sobre o sensor. Assim, esses abrigos fazem com que os valores de temperatura medidos representem a condição térmica do ar local.

O abrigo meteorológico foi confeccionado com discos de alumínio de 15 cm de diâmetro, sem pintura, placas de aço de 0,28”, montados em espaçadores com cilindro de TEFLON de 3,0 cm de comprimento e 1,3 cm de diâmetro, prensa cabo e parafusos, conforme Sugawara (2003) (Figura 22).

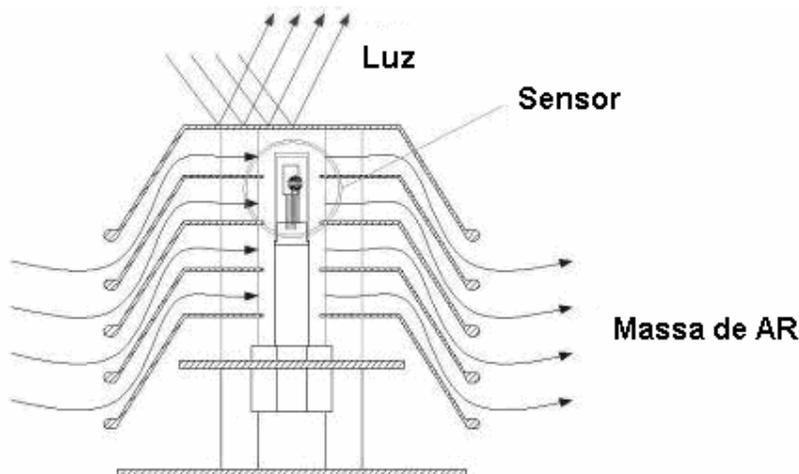


Figura 22 – Abrigo do sensor de temperatura.

Esse tipo de abrigo foi testado juntamente com o abrigo de estações meteorológicas automáticas comerciais e obtiveram-se resultados satisfatórios (Sugawara, 2003).

A Figura 23 mostra o protótipo do abrigo de sensores construído com disco de alumínio, espaçadores de TEFLON e placas de aço, com os detalhes das dimensões.

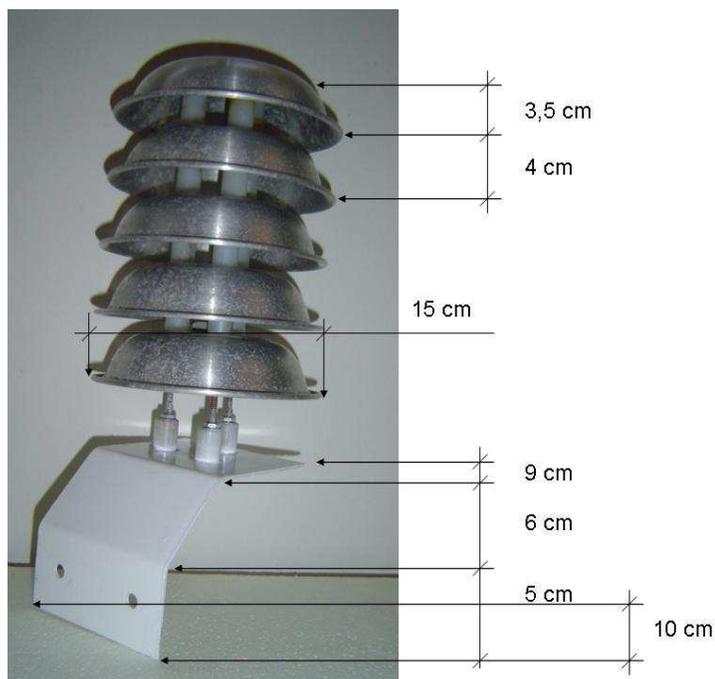


Figura 23 – Abrigo de sensor de temperatura construído com discos de alumínio, espaçadores de TEFLON, suporte de aço com os detalhes das dimensões.

3.4. Evapotranspiração de referência (ET_o)

A ET_o diária (mm d⁻¹) estimada pelo Protótipo utilizando a RNA foi confrontada com a ET_o determinada pelo modelo de Penman-Monteith (Equação 06), na forma parametrizada pelo boletim 56 da Organização para Agricultura e Alimentos (FAO-56) (Allen et al., 1998) e pelo modelo de Hargreaves-Samani (Equação 07) (Hargreaves-Samani, 1985), obtido a partir dos dados coletados pela estação Thies-Clima.

$$ET_o = \frac{0,408 s (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{méd} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (06)$$

em que,

- R_n = Saldo de radiação à superfície da cultura, $MJ m^{-2} d^{-1}$;
 G = Fluxo de calor no solo, $MJ m^{-2} d^{-1}$;
 $T_{méd}$ = Temperatura média diária do ar a 2 m de altura, [$T_{méd} = (T_{máx} + T_{mín})/2$], $^{\circ}C$;
 $T_{máx}$ e $T_{mín}$ = temperaturas máxima e mínima diária do ar, $^{\circ}C$;
 s = Declividade da curva de pressão de vapor no ponto de $T_{méd}$, $kPa ^{\circ}C^{-1}$;
 γ = Coeficiente psicrométrico, $kPa ^{\circ}C^{-1}$;
 u_2 = Velocidade do vento a 2 m de altura, $m s^{-1}$;
 e_s e e_a = Pressão de vapor de saturação e parcial de vapor d'água no ar, kPa ;

Detalhes dos procedimentos para determinação das variáveis supracitadas são descritas no boletim FAO-56 (Allen et al., 1998).

$$E^H = 0,408 \frac{R_a (T_m - T_m) \gamma}{a x i n s} (T + 1) \quad (07)$$

ETo^H = evapotranspiração de referência calculada pelo método de Hargreaves, mm/d ;

R_a = radiação solar extraterrestre, mm/d ;

T_{max} = temperatura máxima do ar, $^{\circ}C$; e

T_{min} = temperatura mínima do ar, $^{\circ}C$.

3.5. Estimativa de ETo usando a Rede Neural

A estimativa da ETo pelo Protótipo foi feito utilizando o modelo de RNA's desenvolvido por Zanetti et al. (2007). O modelo de RNA desenvolvido por esse autor consiste em uma operação algébrica dos dados de entrada (temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}C$), radiação solar extraterrestre ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) e duração máxima de insolação diária (horas)) em relação às matrizes de pesos (w_1 e w_2), bias (b_1 e b_2), das camadas de neurônios oculta e de saída. Estes dados estão apresentados na Quadro 03.

Quadro 03. Matrizes de pesos (w1 e w2) e bias (b1 e b2), referentes à rede neural artificial desenvolvida por Zanetti et al. (2007), para estimar a ETo em Campos dos Goytacazes-RJ.

b ₁		w ₁					b ₂		
-197,2160	1,6286	-1,3474	3,0568	4,1851		-2,1121			
-9,4286	3,5874	-2,6413	5,4744	-26,1476					
29,8265	0,2155	-0,3568	1,4024	-6,2655					
-36,0609	0,2438	-0,2883	0,4021	1,9509					
147,2884	-2,0417	3,9917	4,7098	-25,5648					
38,6812	0,0952	-0,0782	0,4521	-4,7161					
-21,6602	-1,0142	0,5724	-1,7732	8,7299					
-11,2148	-17,5969	36,8220	-3,5751	-1,4962					
-2,4016	0,0424	0,8396	-0,6630	-3,9742					
-0,9182	0,1034	-0,0650	-0,0026	-0,0399					
		w ₂							
0,1696	0,4113	-1,1756	1,3648	0,0430	-1,4045	-0,2447	0,0229	-4,6324	3,8754

3.6. Balanço hídrico

O balanço hídrico é a contabilização da água no solo, resultante da aplicação do princípio da conservação de massa em um volume de solo vegetado, ou seja, representa a quantificação do que entrou e saiu de água do volume de controle (Pereira et al., 2002).

Estimando-se a quantidade de água extraída do solo pela evapotranspiração, conhecendo-se a quantidade de água que entrou no sistema por intermédio da chuva, medida pelo pluviômetro, e da irrigação, e tendo os valores dos coeficientes de cultura (Kc) tabelados para diferentes estágios de desenvolvimento da cultura, pode-se estimar o quanto irrigar baseado nas equações (08) e (09), com suas respectivas condições.

$$CTA = \frac{(CC - PM)}{10} Da Z \quad (08)$$

$$D_i = D_{i-1} + ETc_i - (P_i + I_i) \quad (09)$$

tendo-se que,

$$\begin{array}{ll} D_i = 0 & \text{para:} \\ D_i = CTA & \text{para:} \end{array} \quad \begin{array}{l} D_i < 0 \\ D_i > CTA \end{array}$$

em que,

- CTA = Capacidade total de água no solo, mm;
- CC = Capacidade de campo do solo, % em peso;
- PM = Ponto de murcha permanente do solo, % em peso;
- Da = Densidade aparente do solo, g cm^{-3} ;
- Z = Profundidade efetiva das raízes, cm;
- D_i = Déficit de água do solo no final do período i ;
- D_{i-1} = Déficit de água do solo no final do período $i - 1$;
- ET_{C_i} = Evapotranspiração ocorrida no período i ;
- P_i = Precipitação ocorrida no período i ; e
- I_i = Irrigação realizada no período i .

Para cálculo da CTA, foram coletadas amostras de solo visando a identificar a curva característica de retenção de água. A partir dessa, obteve-se o PMP (23,2%) e a CC (35%) necessária para a realização do referido cálculo.

Assim, os parâmetros solo foram inseridos nas variáveis do programa, onde, com os dados de ET_o , precipitação e lâmina de irrigação, o sistema simulou o balanço hídrico, mostrando a quantidade real de água no solo.

3.7. Avaliação dos resultados

Os resultados foram avaliados por meio da análise de regressão, do índice de concordância de Willmott (Willmott et al., 1981) apresentado por Camargo e Sentelhas (1997).

Sobre a análise do desempenho de dados da estação meteorológica, encontram-se na literatura diversos trabalhos relatando a utilização de diferentes indicadores estatísticos (Sentelhas et al., 1997; Souza et al., 2002; Blanco e Sentelhas, 2002; Sentelhas e Camargo, 1996).

Diante destas evidências foram calculados alguns dos índices estatísticos atualmente mais utilizados para avaliação do desempenho de dados de estações meteorológicas, já que não se conhece um método que possa ser utilizado como padrão.

Camargo e Sentelhas (1997) recomendam que, ao comparar valores observados e estimados, sejam considerados o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981).

Segundo os pesquisadores, a precisão do modelo é dada pelo coeficiente de correlação e a sua exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada pelo índice de concordância (d), Equação 10.

O índice d é um valor adimensional, variando entre 0 e 1, sendo que o completo ajustamento é representado pelo valor 1 e o valor 0 indica o oposto.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

em que:

- n = número de observações;
- E_i = valor estimado pelo modelo;
- O_i = valor observado experimentalmente; e
- \bar{O} = média dos valores observados experimentalmente.

Além das modificações nos índices anteriores, Legates e McCabe Jr. (1999), Fox (1981) sugerem que, adicionalmente, deve-se analisar o erro absoluto médio (EAM), Equação 11, a raiz do erro quadrado médio (REQM), Equação 12, e, ainda, gráficos representando os pontos observados e estimados, juntamente com os coeficientes de ajuste de regressões lineares simples ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre estes. Neste caso, optou-se também por calcular a probabilidade de significância do teste “F” (P), visando analisar a significância da relação retilínea entre os dados observados e estimados, em nível de 1% de probabilidade. O teste “t” foi utilizado para avaliar estatisticamente o valor do intercepto ($H_0: \beta_0 = 0$) e da inclinação da reta ($H_0: \beta_1 = 1$), em nível de 1% de probabilidade.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - O_i|}{n} \quad (11)$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (12)$$

em que:

- N = número de observações;
 E_i = valor estimado pelo modelo;
 O_i = valor observado experimentalmente.

Camargo e Sentelhas (1997), Souza et al. (2002) e Steidle Neto e Zolnier (2006), em estudos semelhantes envolvendo sensores eletrônicos, utilizaram esses coeficientes para avaliação dos resultados e obtiveram resultados satisfatórios.

Willmott (1981), propôs que erro sistemático pode ser descrito pelo erro quadrado médio sistemático (EQMs); e o erro não sistemático pelo erro quadrado médio não sistemático (EQMns), Equações 13 e 14, respectivamente.

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (E - O)}{n} \quad (13)$$

$$EQM_s = \frac{\sum_{i=1}^n (E - \hat{E}_i)}{n} \quad (14)$$

O mesmo autor verificou que o sistema é conservativo, onde a soma dos quadrados dos erros sistemáticos (EQMs) e não sistemáticos (EQMns) resultam no erro quadrado médio (EQM), Equação 15.

$$EQM^2 = (EQM_s)^2 + (EQM)^2 \quad (15)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Desempenho do Protótipo para estimação das temperaturas máxima e mínima

Os valores de temperatura medidas e coletadas no período foram divididos em dois grupos de análises; o primeiro, em temperatura máxima, em que os dados variaram de 21,3 a 33,4 °C e o segundo em temperatura mínima, em que os dados variaram de 12,3 a 22,5 °C.

Na Figura 24 é apresentada a dispersão dos dados de temperatura máxima medida pelo Protótipo em relação aos dados coletados pela estação Thies-Clima. Apresenta-se, ainda, a reta 1:1, a equação de ajuste, o intervalo de confiança de 99% e o respectivo coeficiente de determinação (r^2).

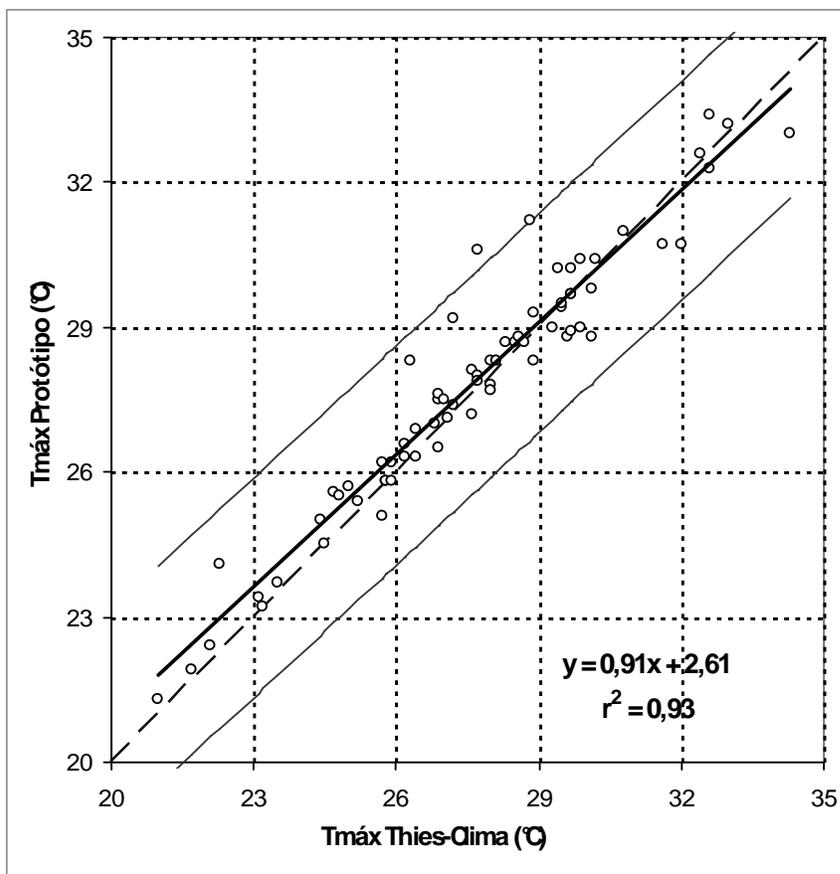


Figura 24 – Gráfico de desempenho do protótipo para estimativa da temperatura máxima.

O resultado obtido para temperatura máxima mostrou que o sensor de temperatura LM35 teve um bom desempenho, onde o valor do EAM foi de 0,52 para temperatura máxima, semelhante aos encontrados por outros pesquisadores (Sentelhas et al., 1997; Souza et al., 2002; e Steidle Neto e Zolnier, 2006).

Na Figura 25 é apresentada a dispersão dos dados de temperatura mínima medida pelo Protótipo em relação aos dados coletados pela estação Thies-Clima. Apresenta-se, ainda, a reta 1:1, a equação de ajuste, o intervalo de confiança de 99% e o r^2 .

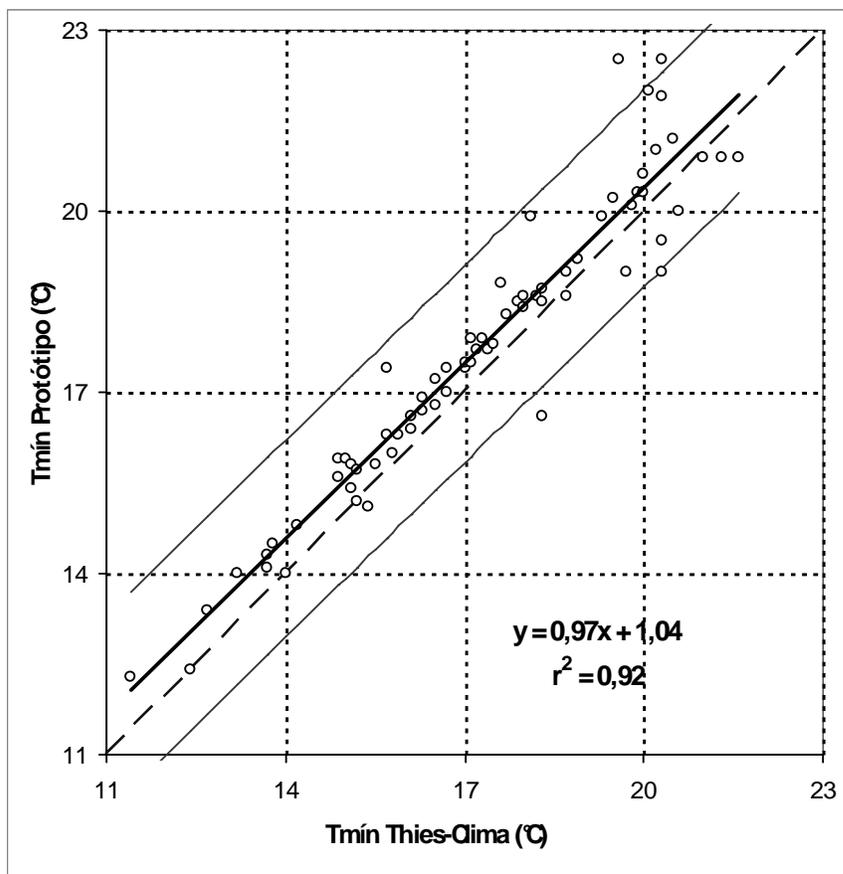


Figura 25 – Gráfico de desempenho do protótipo para estimativa da temperatura mínima.

No Quadro 04 estão apresentados os resultados estatísticos dos dados de temperatura máxima e mínima coletados pela estação Thies-Clima e o Protótipo.

Os resultados indicam que os índices de comparação utilizados para os dados de temperatura (máxima e mínima) estão semelhantes aos encontrados por Steidle Neto e Zolnier (2006), Sentelhas et al. (1997).

Quadro 04 – Resultados do desempenho do Protótipo em relação à temperatura (máxima e mínima).

Temperatura	d	EAM (°C)	REQM (°C)	r^2	P
Máxima	0,9791	0,522	0,78	0,93	$2,15 \times 10^{-38}$
Mínima	0,9688	0,65	0,86	0,92	$1,6 \times 10^{-40}$

As regressões lineares simples dos dados de temperaturas máximas e mínimas coletados pelo protótipo e EMA apresentaram resultados significativos pelo Teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Observa-se que houve uma concordância entre os valores de temperatura, onde a linha representativa da equação de regressão aproximou-se da reta 1:1.

O desempenho pode ser atestado tanto pela precisão, $r^2 = 0,93$, como pela sua exatidão, $d = 0,98$ e o EAM = 0,52 °C para temperatura máxima; $r^2 = 0,92$, $d = 0,97$ e EAM = 0,66 °C para temperatura mínima. Observa-se que o sensor de temperatura LM-35, montado no abrigo meteorológico teve um desempenho melhor para a temperatura máxima.

Para a temperatura máxima, o teste t apresentou significância estatística, ao nível de 1% de probabilidade, para intercepto, mostrando que difere estatisticamente de zero e para o coeficiente angular difere estatisticamente de 1.

Apesar do menor desempenho comparativamente ao desempenho da estimativa da temperatura máxima, para o modelo de estimativa da temperatura mínima, o teste t, para os parâmetros das equações lineares, demonstrou que o intercepto não diferiu de 0 e que a inclinação não diferiu de 1.

Este desvio sistemático pode estar ligado à dissipação do calor no material utilizado para o abrigo de sensores. O mesmo pode ser corrigido via programação, ou até mesmo no circuito condicionador de sinal do microcontrolador.

4.2. Desempenho do Protótipo para estimação da evapotranspiração

Na Figura 26 é apresentada a dispersão dos valores estimados de evapotranspiração pelo método de HS em relação aos valores de evapotranspiração calculados pelo método de PM-FAO.

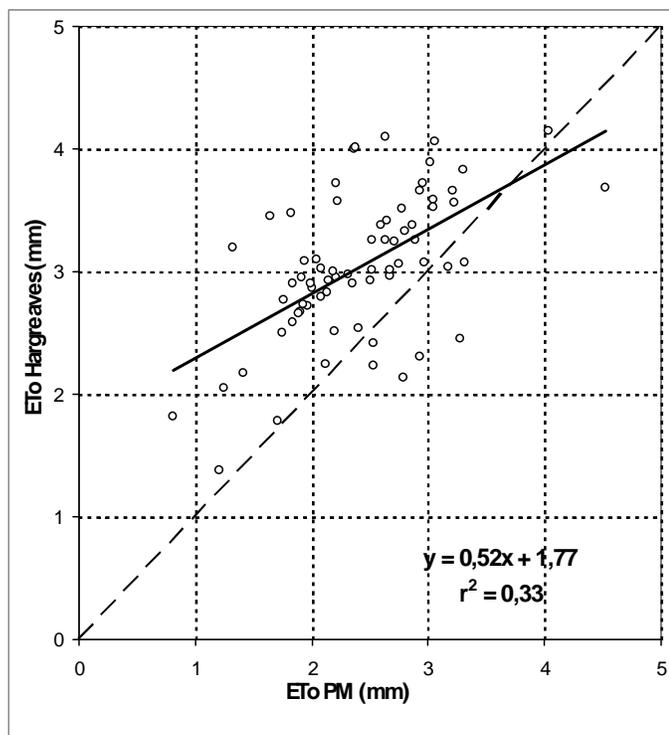


Figura 26 – Gráfico de correlação entre os valores estimados pelo método de HS (ETo Hargreaves), em relação ao método de PM-FAO (ETo_PM).

Os resultados obtidos mostraram que a ETo calculada pelo modelo de HS superestima os valores de ETo calculados com os dados coletados pela estação Thies-Clima, usando o modelo de PM-FAO.

A Figura 27 mostra os valores de ETo, via PM-FAO, e o Protótipo, em relação à reta 1:1, a equação de ajuste e o respectivo r^2 .

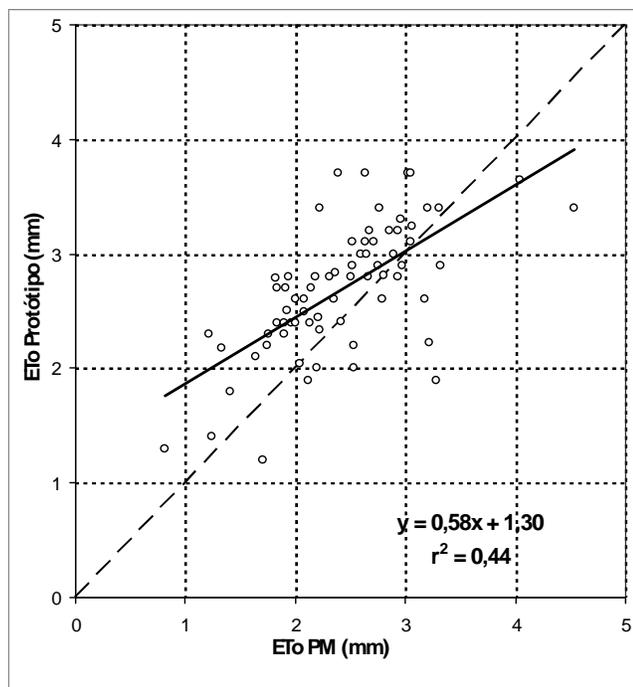


Figura 27 – Gráfico de correlação entre os valores estimados pelo Protótipo (ETo Protótipo), em relação ao método de PM-FAO (ETo_PM).

No Quadro 05 estão apresentados os resultados estatísticos dos dados de ETo_PM estimados com os dados da estação Thies-Clima, comparados com os valores de ETo calculados pela equação de Hargreaves & Samani e o Protótipo.

Quadro 05 – Resultados do desempenho do Protótipo em relação à ETo_PM e ETo_HS.

Método ETo	\bar{O}	\bar{E}	sO	sE	N	a	b	EAM	REQM	EQMs	EQMns	d	r^2	P
ETo Protótipo	2,43	2,68	0,39	0,56	69	1,3**	0,58**	0,5	0,52	0,43	0,29	0,77	0,43	$5,71 \times 10^{-10}$
ETo Hargreaves	2,43	3,04	0,39	0,59	63	1,8**	0,52**	0,7	0,85	0,53	0,66	0,64	0,33	$1,89 \times 10^{-7}$

\bar{O} e \bar{E} , média dos valores observados e estimados respectivamente; sO e sE, desvio padrão dos valores observados e estimados respectivamente; N, número de dados; "a" e "b", intercepto e inclinação da regressão linear; EAM, erro absoluto médio; REQM, raiz do erro quadrado médio; RMSEs, raiz do erro quadrado médio sistemático; RMSEns, raiz do erro quadrado médio não sistemático; d, índice de concordância de Willmott (1981); r^2 , coeficiente de determinação; P, probabilidade.

Examinando o resumo dos parâmetros de posição e escala (\bar{E} e sE), verifica-se que todos os métodos superestimaram os parâmetros de posição e subestimaram os parâmetros de escala observados correspondentes (\bar{O} e sO), consistente com a interpretação gráfica (Figuras 26 e 27). A mE do método do Protótipo superestima em aproximadamente 10 % o valor observado, enquanto que o método de Hargreaves superestima em torno de 25 % o valor observado.

Os parâmetros da regressão "a" e "b", para os métodos avaliados, indicaram a necessidade de um melhor ajustamento em relação aos dados

observados. Isso pode ser explicado devido a uma faixa limitada de variação dos valores observados em torno da média.

Em relação ao EAM e REQM, nota-se uma distinção entre os métodos, indicando um melhor desempenho do método do Protótipo. Isto pode ser confirmado pelo índice de concordância de Willmott (1981) e coeficiente de determinação, onde o índice d para o método do Protótipo foi mais próximo de 1 e o r^2 foi maior.

O melhor desempenho do método do Protótipo pode ser verificado pelo menor erro sistemático (RMSEs) e menor erro não sistemático (RMSEns), (Quadro5).

Para a estimativa da evapotranspiração, o método do Protótipo teve o melhor desempenho comparado com o método de Hargreaves-Samani.

4.3. Desempenho do Protótipo para estimativa do Balanço Hídrico

O balanço hídrico foi calculado pelo microcontrolador com os mesmos dados da estação meteorológica automática. As variações apresentadas foram similares, comparado ao programa computacional para verificar os erros.

Na Figura 28 é apresentado o gráfico da umidade disponível no solo, o efeito conjunto da evapotranspiração da cultura, os parâmetros físicos do solo, a disponibilidade total de água, o fator disponibilidade e a precipitação.

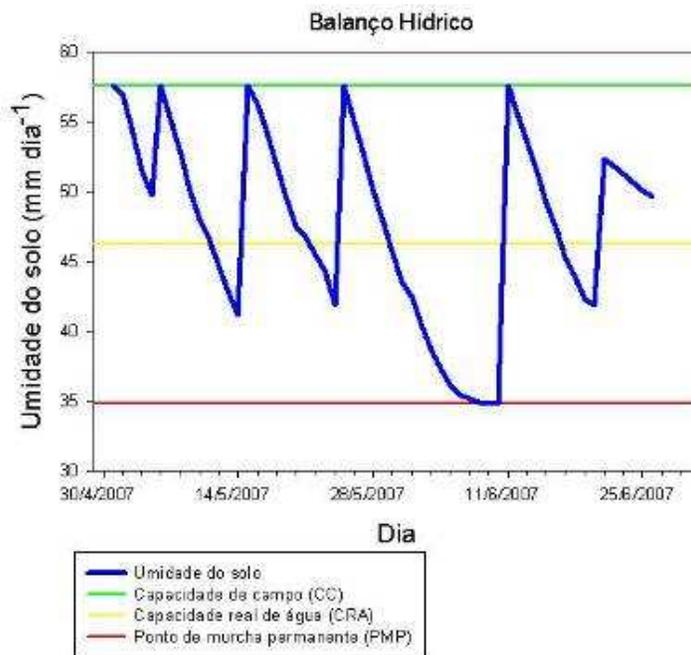


Figura 28 – Gráfico do balanço hídrico do solo no período estudado.

O resultado obtido mostrou que o Protótipo teve desempenho satisfatório em calcular o balanço hídrico com os dados coletados de chuva e com os valores de ETo, podendo ser uma boa referência para o monitoramento da disponibilidade hídrica do solo e, conseqüentemente, para o manejo de irrigação.

4.4. Custo do Protótipo

O custo total do protótipo, incluindo o pluviômetro importado, foi de aproximadamente, R\$ 2143,00. Esse custo envolve o microcontrolador, caixa hermeticamente fechada, bases de tubo de aço, componentes eletrônicos e não eletrônicos, painel solar, bateria, pluviômetro, outros componentes adicionais e a mão-de-obra, conforme apresentado no Quadro 06.

Quadro 06 – Quadro com os valores dos componentes utilizados

Materiais	Quantidade	Preço (R\$)	Total
Microcontrolador	1	28,00	28,00
Pluviômetro	1	1100,00	1100,00
Caixa	1	230,00	230,00
Base	2	30,00	60,00
Coponentes eletrônicos	1	90,00	90,00
Componentes não eletrônicos	1	200,00	200,00
Painel solar	1	380,00	380,00
bateria	1	55,00	55,00
Total Geral			2143,00

O custo total do Protótipo mostrou que o equipamento tem uma relação custo/benefício muito aceitável, comparando-se com os equipamentos comerciais existentes no mercado.

Isto implica que o custo de manutenção e reposição de componentes do equipamento torna-se mais acessível para os pequenos produtores rurais, em relação aos equipamentos importados.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O monitoramento do consumo de água pelas plantas, baseado nas condições ambientais, tem sido adotado com maior frequência, pelo fato de que a representatividade espacial é superior aos métodos pontuais baseados no conteúdo de água no solo.

As variáveis meteorológicas necessárias para aplicação de métodos mais sofisticados de estimação da evapotranspiração de referência (ET_o) nem sempre estão disponíveis. Verifica-se a importância dos métodos simplificados para estimar a ET_o em função de elementos climáticos que podem ser obtidos de forma prática, como a temperatura do ar.

Sendo assim, diante da necessidade de facilitar a estimativa da ET_o para o manejo de irrigação, foi realizado este estudo para desenvolver e avaliar um equipamento para o monitoramento do ambiente, com vista a estimação da ET_o e do balanço hídrico do solo.

Foram feitos testes em campo do Protótipo, onde foram analisados o desempenho dos sensores e a estimativa da ET_o do equipamento.

A análise do resultado obtido para os dados de temperatura máxima e mínima demonstrou que o sensor de temperatura LM-35 teve desempenho satisfatório para todas as ferramentas de análise utilizadas.

Para estimativa da evapotranspiração, os resultados indicaram que o modelo de RNA desenvolvidos por Zanetti et al. 2007 teve um melhor

desempenho do que o modelo de Hargreaves & Samani (1985) para todas as ferramentas de análise utilizadas.

Os cálculos de Balanço hídrico calculados pelo microcontrolador foram similares aos calculados pela planilha de dados.

O custo total do Protótipo, incluindo o pluviômetro importado, foi de aproximadamente R\$ 2000,00. Considerando-se o dólar a R\$ 2,00, este valor representa apenas 20% do custo de uma estação meteorológica automática comercial, sendo mais viável a aquisição e o uso do protótipo pela maioria dos produtores agrícolas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alencar, C. A. B., Cunha, F. F. da, Ramos, M. M., Soares, A. A., Pizziolo, T. A., Oliveira, R. A. de,; *Análise da Automação em um Sistema de Irrigação Convencional Fixo por Miniaspersão*. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.15, n.2, 109-118, Abr./Jun., 2007.
- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L. S. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* . v. 43, n. 2, p.1-34, 1994.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).
- Amatya, D. M., Skaggs, R. W., Gregory, J. D. Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 121, n. 6, p. 427-435, 1995.
- Arca, B.; Beniscasa, F.; Vincenzi, M. Evaluation of neural network techniques for estimating evapotranspiration. *National Research Council, Sassari*, 2004. Disponível em: <http://server.ss.ibimet.cnr.it/~arca1/papers/Evaluation%20of%20neural%20network%20techniques%20for%20estimating%20evapotranspiration_EANN_2001.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2004.
- Ashraf, M., Loftis, J. C., Hubbard, K. G. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agricultural and Forest Meteorology*,

- v.74, p. 225-271, 1997.
- Azoff, E. M. Neural network time series forecasting of financial markets, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- Berlato, M. A., Molion, L. C. B. *Evaporação e Evapotranspiração*. IPAGRO – Instituto de pesquisas Agronômicas, Boletim Técnico, Rio Grande do Sul, maio de 1981, 95p.
- Bernardo, S. *Manual de irrigação*. 6. ed. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, 1996. 657 p.
- Bonomo, R. *Análise da Irrigação na Cafeicultura em Áreas de Cerrado de Minas Gerais*. Viçosa, MG, UFV, 1999. 224p. (Tese de doutorado).
- Braga, A. P.; Ludemir, T. B.; Carvalho, A. C. P. L. F. *Redes neurais artificiais: teoria e aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 262 p. 2000.
- Bueno E. I. *Utilização de Redes Neurais Artificiais Na Monitoração e Detecção de Falhas em Sensores do Reator IEA-R1*. Tese de Mestrado (Mestre em Ciências da Área de Tecnologia Nuclear – Reatores), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, São Paulo, 98 p. 2006.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Carvalho, A. P. de Leon F. de. *Redes Neurais Artificiais*. Disponível em (<http://www.icmc.usp.br/~andre/research/neural/index.htm>)
- Coelho Filho, M. A.; Castro Neto, M. T. de; Coelho, E. F. Transpiração máxima de plantas de mamão (*Carica papaya* L.) em pomares fertirrigado, nas condições de cruz das almas BA. (Compact disc) In: *Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem*, 12, 2002, Uberlândia - MG. Anais... Uberlândia. ABID, 2002. (CD-Rom).
- Cordeiro, E. A. *Influência do Tratamento de Água Ferruginosa no Desempenho de Sistema de Irrigação por Gotejamento* Viçosa Minas Gerais – Brasil 2002 91p (Tese de doutorado).
- Daher, R. F., Maldonado, H., Gome, F. F., Fabregas, I. C. S., Soares, C. S., Fonseca, C. W., Introdução e Avaliação de 12 Gramíneas Forrageiras em Campos Dos Goytacazes, RJ. *Ciênc. agrotec.*, Lavras. Edição Especial,

- p.1575-1579, dez., 2002.
- Doorenbos, J., Pruitt, J. O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage, 24).
- Doorenbos, J., Kassam, A. H. *Yield response to water*. Roma: FAO, 1979. 193p. (irrigation and drainage Paper, 33).
- Espindula Neto, D. *Uso racional de água e energia elétrica na cafeicultura irrigada por pivô central e gotejamento*. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Everardo Chartuni Mantovani, 2002.
- Exsto Tecnologia. *Apostila de Programação C para PIC*. 2004. Disponível em: www.exsto.com.br.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. *Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature*. Chicago, Amer. Soc. Agric. Eng. Meeting, (Paper 85-2517) 1985.
- Haykin, S. *Redes Neurais: princípios e prática*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 900 p. 2001.
- Hubbard, K. G. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.68, p. 29-41, 1994.
- Hubbard, K. G., Rosemberg, N. J., Nielsen, D. C. Automated weather data network for agriculture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n.3, p.213-222, 1983.
- Kovács, Z. L.; *Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações*. 3. ed. São Paulo: Livraria da Física, 174 p. 2002.
- Kumar, M.; Raghuwanshi, N. S.; Singh, R.; Wallender, W. W.; Pruitt, W. O. Estimating evapotranspiration using artificial neural network. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.128, n.4, p. 224-233, 2002.
- Legates, D. R., McCabe Jr., G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1):233-241, 1999.
- Marouelli, W. A.; Silva, W. L. C. Manejo de irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: *Congresso brasileiro de engenharia agrícola/manejo de irrigação*, 27, Poços de Caldas. Anais. Poços de Caldas, UFLA/SBEA, 378 p., 1998.

- Medeiros, A. T., Sentelhas, P. C., Lima, R. N. de, Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de penman-monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em PARAIPABA - CE. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.23, n.1, p.31-40, jan. 2003.
- Mendonça, J. C., Sousa, E. F., Bernardo, S., Sugawara, M. T., Pessanha, A.L., Gottardo, R. D. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, UAEAg/UFCG, v.11, n.5, p.471-475, 2007.
- Moraes, C. C.; Castrucci, P.L. *Engenharia de Automação Industrial*. São Paulo: LTC, 2001. 295p.
- Odhiambo, L. O.; Yoder, R. E.; Yoder, D. C.; Hines, J. W. Optimozation of fuzzy evapotranspiration model through neural training with input-output examples. *Transactions of the ASAE*, v.44, n.6, p. 1625-1633, 2001.
- Oliveira, M. A de, *Aplicação de Redes Neurais Artificiais da Análise de Séries Temporais Econômico-Financeiras*, Tese de Doutorado (Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade Departamento de Administração), Universidade de São Paulo, São Paulo-SP 2007, 285 p.
- Pacheco, D. F., Regueira, F. S., Lima Neto, F. B. de, Utilização de Redes Neurais Artificiais em colheitas de cana-de açúcar para predição de PCC, TCH e fibra ALCOOLBrás04] *Revista ALCOOLBrás Especial*. Editora Valete, Edição 87 de Set/Out de 2004.
- Paes, H. M. F., *Demanda hídrica e função de produção da cultura do quiabeiro (*Abelmos chus esculentus*)*, UENF, 2003, tese mestrado, 57p.
- Pereira, A. R.; Villa Nova, N.A.; Sedyama, G.C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- Pereira, A. R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. *Agrometeorologia, Fundamentos e aplicações práticas*. Piracicaba SP, Editora Agropecuária, 2002, 478p.
- Pereira, F. PIC Programação C, Editora Erica, 3ºed . São Paulo, 2004, 359p.
- Rodela, A. A., LQI-800 Métodos instrumentais de análise: texto auxiliar para aulas teóricas, 2003. Disponível em: http://members.tripod.com/quimica_esalq/textunic.doc.
- Rueda, T. C. *Controle automático do nível de poeira baseado em*

- microcontrolador*. Lavras: UFLA, 2005. 42 p.
- Samani, Z., Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.126, n.4, p. 265-267, 2000.
- Sediyama, G. C., Ribeiro, A., Leal, B. G. Relações clima-água-planta. In: Faria, M. A., Silva, E. L., Vilela, L. A. A., Silva, A. M. (Eds.). *Manejo de irrigação*. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p.46-85.
- Sentelhas, P. C., Moraes, S. O., de Estefano Piedade, S. M. Pereira, A. R., Angelocci, L. R., Marin, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.2, p.215-221, 1997.
- Silva, A. F. *Previsão da evapotranspiração de referência utilizando redes neurais*. Viçosa, MG: UFV, 2002. 68 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- Smith, M. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Rome: FAO, 1991. 54p.
- Smith, M., Segeren, A., Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guideline for prediction of crop water requirements*. Rome: FAO, 1991. 45 p.
- Souza, I. de A., Galvani, E., Assunção, H. F. Avaliação de Elementos Meteorológicos Monitorados por Estações Convencional e Automática. *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Foz de Iguaçu-PR, 2002.
- Souza, D. J. de. *Desbravando o PIC*, Editora Erica, 6° ed. São Paulo, 2003, 265p.
- Sousa, E. F. et al. Estimativa da demanda hídrica provável na região norte fluminense. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.22, n.3, p.322-331, 2002.
- Steidle Neto, A. J., Zolnier, S. Avaliação de circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.26, n.2, p.335-343, mai/ago 2006.
- Stemmer, M. R. *Redes Neurais Artificiais para Controle & Automação*. DAS/CTC/UFSC, Apostila de curso sobre redes neurais 2006

- Sudheer, K. P.; Gosain, A. K.; Ramasastri, K. S. Estimating actual evapotranspiration from limited climatic data using neural computing technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.129, n.3, p. 214-218, 2003.
- Sugawara, M. T., *Estudo de sensores de baixo custo para estação meteorológica automática*. Viçosa, MG: UFV, 2003. 68 p. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- Tinós, R., *Detecção e Diagnóstico de Falhas em Robôs Manipuladores Via Redes Neurais Artificiais*, Tese de Mestrado (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo), Universidade de São Paulo, São Paulo-SP 1999, 117 p.
- Trajkovic, S.; Todorovic, B.; Stankovic, M. Forecasting of Reference Evapotranspiration by Artificial Neural Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.129, n.6, p. 454-457, 2003.
- Varejão Silva, M. A. *Meteorologia e Climatologia (INMET)*. Brasília DF, 2000, 515p.
- Varella, C. A. A., Pinto, F. de A. C., Queiroz, D. M. de, Sena Júnior, D. G. de, Determinação da cobertura do solo por análise de imagens e redes neurais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.225-229, 2002 Campina Grande, PB, DEAg/UFCG - <http://www.agriambi.com.br>
- Willmott, C. J. On the validation of model. *Physical Geography*, v.2, n.2, p.184-194, 1981.
- Willmott, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *American Meteorological Society*, v.82, p.1309-1313, 1982.
- Zanetti, S. S.; Sousa, E. F.; Oliveira, V. P. S.; Almeida, F. T.; Bernardo, S. Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.33, n.2, p.83-89, 2007.
- Zanetti, S. S.; Sousa, E. F.; Carvalho, D, F. de e Bernardo, S. Estimacão da evapotranspirao de referência no Estado do Rio de Janeiro usando redes neurais artificiais. *Rev. bras. eng. agrc. ambient.* [online]. 2008, vol. 12, no. 2, pp. 174-180. ISSN 1415-4366.