

ANTONIO JOSÉ STEIDLE NETO

SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA PREPARO E APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES  
NUTRITIVAS COM BASE NA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO  
DO TOMATEIRO CULTIVADO EM CASA DE VEGETAÇÃO

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S818s  
2007

Steidle Neto, Antonio José, 1976 -

Sistema computadorizado para preparo e aplicação de soluções nutritivas com base na estimativa da transpiração do tomateiro cultivado em casa de vegetação / Antonio José Steidle Neto. - Viçosa : UFV, 2007.  
x, 159f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 123-130.

1. Adubos e fertilizantes - Aplicação. 2. Sistemas de controle digital. 3. Condutividade elétrica. 4. Detectores - Calibração. 5. Tomate - Cultivo. 6. Hidroponia.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.


CDD 22.ed. 631.81

ANTONIO JOSÉ STEIDLE NETO


SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA PREPARO E APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES  
NUTRITIVAS COM BASE NA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO  
DO TOMATEIRO CULTIVADO EM CASA DE VEGETAÇÃO

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


APROVADA: 28 de fevereiro de 2007.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Waldir Aparecido Marouelli  
(Co-orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Antonio Saraiva Grossi

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Aristides Ribeiro

  
\_\_\_\_\_  
Dr<sup>a</sup>. Maria Aparecida N. Sedyama

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sérgio Zolnier  
(Orientador)

Obrigado, Jesus Cristo, pela tua presença constante ao meu lado!

Tu és a força no momento de fraqueza, a alegria no momento de tristeza.

Tu és a paz na angústia e na aflição, és a rocha que alicerça meus projetos e o embalo harmonioso que me acalma nas noites de inquietação.

Tu és a luz que ilumina o meu caminho e a energia que me faz caminhar.

Quando caio, me levantas; quando me decepçiono, me animas; quando sinto medo, me fortaleces.

Em Ti confio plenamente e a todo momento agradeço pelas bênçãos e maravilhas que realiza a cada novo dia.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Antonio José Steidle Filho e Teresinha Isabel de Figueiredo, pelo amor, educação e incentivo ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos Rodrigo Steidle, Dennys Steidle e Marcos Vinícius de Andrade Steidle, pelo carinho e amizade.

À minha esposa Daniela de Carvalho Lopes, pelo amor, compreensão, ternura e cumplicidade imprescindíveis em todos os momentos.

À minha querida vó Nilce de Figueiredo Machado, pela emoção e alegria prazerosas nos momentos de reencontro.

À minha família paterna e materna, pelas demonstrações sinceras de apreço.

Ao amigo e padrinho José Roberto Russo, pelo companheirismo, ensinamentos e inesquecíveis lições de vida.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por propiciar uma formação acadêmica digna.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Projeto de apoio ao Desenvolvimento de Tecnologia Agropecuária para o Brasil (PRODETAB), pelos recursos financeiros.

Ao professor Sérgio Zolnier, pelos ensinamentos, empenho, comprometimento científico e por impulsionar decisivamente o meu desenvolvimento como pesquisador.

À professora Herminia Emilia Prieto Martinez, pelas orientações e colaboração.

Ao pesquisador Waldir Aparecido Marouelli (Embrapa Hortaliças), pelas sugestões e contribuições indispensáveis.

À pesquisadora Maria Aparecida Nogueira Sediya (Epamig - CTZM), pela receptividade e cordialidade.

Ao professor José Antonio Saraiva Grossi, pela amizade e confiança no meu potencial.

À professora e madrinha Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, pelo carinho e motivação constantes.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA - UFV), em especial, Aristides Ribeiro, José Helvecio Martins, Paulo Marcos de Barros Monteiro e Mauro Aparecido Martinez, pelas importantes contribuições.

Aos professores do Departamento de Fitotecnia (DFT - UFV) Fernando Luiz Finger, Derly José Henriques da Silva e Luiz Carlos Chamhum Salomão, pelo auxílio científico e disponibilidade incondicional.

Ao técnico Newton Deniz Piovesan (Bioagro - UFV), pela concessão da casa de vegetação para o cultivo do tomateiro.

A todos os amigos da Meteorologia e Engenharia Agrícola, especialmente, Thieres George Freire da Silva, Carlos Roberto Weide Moura, Marconi Batista Teixeira, José Eduardo Carvalho Monte, Paulo Raimundo Pinto, Flávio Aparecido Gonçalves, Carlos Alberto Teixeira e Alexandre Silva Mudrik, pela solicitude sincera e gratuita nos momentos necessários.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, José Galinari Sobrinho, Joel de Freitas Gomide, Álvaro de Araújo, Luiz Mauro Balbino, Aguinaldo Carlos de Sousa, Francisco Viana Teixeira, Maria José Cruz da Silva e Pedro Hilário Filho, pela colaboração indispensável.

A todos que, por um lapso de memória, não tenham sido lembrados, mas que contribuíram de alguma maneira para a concretização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

ANTONIO JOSÉ STEIDLE NETO, filho de Antonio José Steidle Filho e Teresinha Isabel de Figueiredo, nasceu em São Paulo, Capital, em 27 de janeiro de 1976.

Em março de 2001, concluiu o curso de Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Em fevereiro de 2003, concluiu o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambiente, pela Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2003, iniciou o curso de Doutorado em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2007.

## SUMÁRIO

	folha
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1. Introdução</b> .....	01
<b>2. Objetivos</b> .....	04
<b>2.1. Objetivo principal</b> .....	04
<b>2.2. Objetivos específicos</b> .....	04
<b>3. Automação aplicada ao preparo e ao manejo de soluções nutritivas em hidroponia</b> .....	05
<b>3.1. Introdução</b> .....	05
<b>3.2. Sistemas de controle</b> .....	05
<b>3.2.1. Sistemas de controle em malha aberta</b> .....	06
<b>3.2.2. Sistemas de controle em malha fechada</b> .....	07
<b>3.3. Sistemas computadorizados de controle aplicados à hidroponia</b> .....	09
<b>3.4. Sistemas comerciais de controle aplicados à hidroponia</b> .....	10
<b>3.5. Sensores</b> .....	11
<b>3.5.1. Sensores de condutividade elétrica</b> .....	12
<b>3.5.2. Sensores de pH</b> .....	16
<b>3.5.3. Sensores de nível</b> .....	18
<b>3.6. Sistemas de injeção de soluções nutritivas concentradas</b> .....	19
<b>3.6.1. Sistemas de injeção por pressão positiva</b> .....	19
<b>3.6.2. Sistemas de injeção por pressão negativa</b> .....	24
<b>4. Material e métodos</b> .....	28
<b>4.1. Circuitos eletrônicos para medição de condutividade elétrica e temperatura de soluções nutritivas</b> .....	28
<b>4.1.1. Medição de resistência elétrica</b> .....	28
<b>4.1.2. Aquisição e processamento de dados de frequência</b> .....	29
<b>4.1.3. Célula de condutividade elétrica</b> .....	31
<b>4.1.4. Calibração e validação do circuito eletrônico de condutividade elétrica</b> .....	31
<b>4.1.5. Calibração e validação do circuito eletrônico de temperatura</b> .....	34
<b>4.2. Desenvolvimento e implementação de um sistema computadorizado de controle aplicado ao cultivo do tomateiro em casa de vegetação</b> .....	37

4.2.1. Produção de mudas, cultivo e manejo do tomateiro em casa de vegetação .....	37
4.2.2. Sistema de aquisição de dados micrometeorológicos .....	44
4.2.3. Sistema automático (computadorizado) para preparo e aplicação de soluções nutritivas .....	47
4.2.4. Estratégia de controle do sistema automático .....	52
4.2.4.1. Capacidade de retenção de água e densidade aparente da areia .....	53
4.2.4.2. Estratégia de controle da concentração de soluções nutritivas .....	54
4.2.4.3. Estratégia de controle da freqüência de aplicação de soluções nutritivas .....	59
4.2.4.3.1. Modelo de estimativa de transpiração em casa de vegetação .....	59
4.2.4.3.2. Estimativa da resistência aerodinâmica em casa de vegetação .....	64
4.2.4.3.3. Coeficientes da cultura do tomateiro .....	67
4.3. Implementação de um sistema convencional (temporizado) de controle aplicado ao cultivo do tomateiro em casa de vegetação .....	72
4.3.1. Estratégia de controle do sistema convencional .....	73
4.4. Simulação da evapotranspiração da cultura do tomateiro .....	76
4.5. Medição de transpiração da cultura do tomateiro .....	76
4.6. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes às fertirrigações e drenagens .....	77
4.6.1. Lixiviação e condutividade elétrica das soluções drenadas .....	77
4.6.2. Influência das estratégias de controle e das variáveis micrometeorológicas sobre a condutividade elétrica dos efluentes .....	78
4.6.3. Freqüências de fertirrigações em dias típicos de céu claro e de céu nublado .....	78
4.6.4. Uso eficiente de água e volumes acumulados de fertirrigações e drenagens .....	79
4.7. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes aos frutos do tomateiro .....	79
4.7.1. Classificação dos frutos por tamanho .....	80
4.7.2. Produtividade total e comercial da cultura do tomateiro .....	81
4.7.3. Sólidos solúveis totais (Brix) .....	81
4.7.4. Podridão apical (fundo preto) .....	82

<b>5. Resultados e discussão .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1. Circuitos eletrônicos para medição de condutividade elétrica e temperatura de soluções nutritivas .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1.1. Calibração dos circuitos eletrônicos de condutividade elétrica e de temperatura .....</b>	<b>85</b>
<b>5.1.2. Validação dos circuitos eletrônicos de temperatura e de condutividade elétrica .....</b>	<b>89</b>
<b>5.2. Sistema automático (computadorizado) para preparo e aplicação de soluções nutritivas .....</b>	<b>91</b>
<b>5.2.1. Programa computacional .....</b>	<b>91</b>
<b>5.2.2. Capacidade de retenção de água e densidade aparente da areia .....</b>	<b>92</b>
<b>5.2.3. Coeficientes da cultura do tomateiro .....</b>	<b>94</b>
<b>5.3. Simulação da evapotranspiração da cultura do tomateiro .....</b>	<b>95</b>
<b>5.4. Medição de transpiração da cultura do tomateiro .....</b>	<b>97</b>
<b>5.5. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes às fertirrigações e drenagens .....</b>	<b>99</b>
<b>5.5.1. Lixiviação e condutividade elétrica das soluções drenadas .....</b>	<b>99</b>
<b>5.5.2. Influência das estratégias de controle e das variáveis micrometeorológicas sobre a condutividade elétrica dos efluentes .....</b>	<b>101</b>
<b>5.5.3. Frequências de fertirrigações em dias típicos de céu claro e de céu nublado .....</b>	<b>106</b>
<b>5.5.4. Uso eficiente de água e volumes acumulados de fertirrigações e drenagens .....</b>	<b>113</b>
<b>5.6. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes aos frutos do tomateiro .....</b>	<b>115</b>
<b>5.6.1. Classificação dos frutos por tamanho .....</b>	<b>115</b>
<b>5.6.2. Produtividade total e comercial da cultura do tomateiro .....</b>	<b>116</b>
<b>5.6.3. Sólidos solúveis totais (Brix) .....</b>	<b>118</b>
<b>5.6.4. Podridão apical (fundo preto) .....</b>	<b>119</b>
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>121</b>
<b>7. Referências bibliográficas .....</b>	<b>123</b>
<b>Apêndice .....</b>	<b>131</b>

## RESUMO

STEIDLE NETO, Antonio José, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2007. **Sistema computadorizado para preparo e aplicação de soluções nutritivas com base na estimativa da transpiração do tomateiro cultivado em casa de vegetação.** Orientador: Sérgio Zolnier. Co-orientadores: Herminia Emilia Prieto Martinez e Waldir Aparecido Marouelli.

Em cultivos sem solo e hidropônicos, o monitoramento contínuo e ajustes freqüentes da concentração de fertilizantes na solução nutritiva a ser aplicada são essenciais para otimizar o crescimento das plantas. Neste trabalho, circuitos eletrônicos de baixo custo foram propostos, calibrados e validados para medições, em tempo real, de condutividade elétrica, na faixa de 0,10 a 10,15  $\text{dS m}^{-1}$ , e de temperatura, para fins de compensação, na faixa de 10 a 40 °C. Adicionalmente, duas técnicas de preparo, ajuste e aplicação de soluções nutritivas foram avaliadas em tomateiros cultivados em substrato de areia sob condições de casa de vegetação. A primeira técnica, denominada de sistema automático, utilizou o modelo de estimativa de evapotranspiração de Penman-Monteith como suporte para tomada de decisão sobre a concentração apropriada de nutrientes e os intervalos de tempo adequados entre eventos de aplicação da solução nutritiva. A segunda técnica, denominada de sistema convencional, utilizou soluções nutritivas preparadas manualmente e intervalos fixos entre fertirrigações. Apesar de ter sido observado um incremento de 16% na produtividade do tomateiro cultivado sob o sistema automático em relação ao convencional, variações de produção entre plantas, possivelmente decorrentes de características do cultivar utilizado, aumentaram o erro experimental e, por isso, não permitiram a constatação de diferenças estatísticas das variáveis tamanho dos frutos, teor de sólidos solúveis totais, produtividade total e comercial. Além disso, o sistema automático proporcionou melhores resultados em termos do uso eficiente de água de irrigação, que foi 45% superior em relação ao convencional. Desta forma, os resultados sugerem que o sistema automático tem grande potencial para redução do uso de fertilizantes, mão-de-obra e problemas ambientais decorrentes do descarte de efluentes em cultivos sem solo e hidropônicos.

## ABSTRACT

STEIDLE NETO, Antonio José, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February of 2007. **Computer system for preparing and applying nutrient solutions with base on the transpiration estimate of tomato cultivated in greenhouse.** Adviser: Sérgio Zolnier. Co-Advisers: Herminia Emilia Prieto Martinez and Waldir Aparecido Marouelli.

In soilless and hydroponic culture, continuous monitoring and frequent adjusts of the fertilizer concentration in nutrient solution to be delivered are essential to optimize plant growth. In this work, low cost electronic circuits were proposed, calibrated and validated for real time measurements of electrical conductivity from 0.10 to 10.15 dS m<sup>-1</sup> and temperature with purpose of compensation from 10 to 40 °C. In addition, two techniques of preparing, adjusting and applying nutrient solutions were evaluated in tomato plants cultivated in sand substrate under greenhouse conditions. The first technique, denoted automatic system, utilized the Penman-Monteith evapotranspiration model as decision support regarding the suitable nutrient solution concentration and appropriate time intervals between application events. The second technique, denoted conventional system, utilized manually adjusted nutrient solutions and fixed intervals between fertigation events. Despite an increment of 16% in the tomato productivity cultivated under the automatic system as compared to the conventional one, production variations among plants, possibly due to cultivar characteristics, increased the experimental error and then prevented the identification of statistical differences of the fruit size, total soluble solid contents and total and commercial productivity. Additionally, the automatic system provided better results regarding irrigation water use efficiency, which was 45% superior to the conventional system. In this way, the results suggest that the automatic system has an enormous potential to reduce fertilizer use, labor and environmental problems associated with the discard of effluents from soilless and hydroponic culture.

## 1. Introdução

Nos cultivos hidropônicos, os nutrientes necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas são incorporados diretamente na água de irrigação. A concentração da solução nutritiva é modificada à medida que as plantas absorvem seletivamente água e nutrientes (ANDRIOLO, 1999). Esta absorção varia significativamente nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura e com as condições micrometeorológicas do ambiente de cultivo (KLÄRING et al., 1997). Por esse motivo, a manutenção de condições favoráveis ao pleno crescimento e desenvolvimento das plantas requer o monitoramento contínuo da solução nutritiva. Neste sentido, medidas de condutividade elétrica são imprescindíveis, pois possibilitam o controle da concentração total de sais dissolvidos na solução, impedindo a deficiência de nutrientes e o estresse nas plantas por alta salinidade (STEIDLE NETO et al., 2005).

De acordo com RESH (1998), a concentração total de sais na solução nutritiva destinada ao cultivo hidropônico de plantas deve estar compreendida entre 1000 e 1500 ppm. Assim, a pressão osmótica facilitará os processos de absorção de água e de nutrientes pelas raízes. Estes valores correspondem a condutividades elétricas entre 1,5 e 3,5 dS m<sup>-1</sup>. Em geral, baixos valores de condutividade elétrica (1,5 a 2,0 dS m<sup>-1</sup>) são recomendados para culturas como a do pepino, enquanto que valores maiores (2,5 a 3,5 dS m<sup>-1</sup>) são indicados para a cultura do tomate. Em quase todos os cultivos hidropônicos realizados no Brasil, o ajuste da condutividade elétrica da solução nutritiva é normalmente executado, uma única vez ao dia, por meio da adição manual de água e/ou soluções-estoque concentradas em um reservatório que contem a solução que recircula pelas raízes das plantas.

A frequência e a duração dos eventos de aplicação da solução nutritiva para as plantas se baseiam, geralmente, apenas em recomendações empíricas. Os sistemas convencionais de fertirrigação para cultivos hidropônicos, controlados por temporizadores, nos quais a frequência e a duração são mantidas fixas, podem causar déficit ou excesso de água e nutrientes por não considerarem as variáveis climáticas e as fases de desenvolvimento da cultura (ROH e LEE, 1996).

Os cultivos hidropônicos de plantas em substratos e os que se baseiam na técnica do fluxo laminar de nutrientes (*Nutrient Film Technique*) requerem, usualmente, fertirrigações com alta frequência e curta duração, a fim de garantir às plantas a irrestrita disponibilidade de água e de nutrientes. Assim sendo, sistemas de controle automático da frequência e da duração das fertirrigações, que considerem as variáveis associadas ao ambiente de cultivo e à cultura, assumem importância fundamental no adequado crescimento e desenvolvimento das plantas.

No Brasil, a maioria das casas de vegetação, onde são cultivadas hortaliças, não apresenta qualquer tipo de climatização capaz de amenizar as condições adversas do microclima interno às instalações. Neste caso, o controle da concentração da solução nutritiva, da frequência e do tempo de fertirrigação cresce em importância devido à influência das variáveis micrometeorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação fotossinteticamente ativa e velocidade do ar) sobre a demanda de água e nutrientes pelas plantas. Segundo LI et al. (2001), sob condições de casa de vegetação, aproximadamente 90% da água absorvida pelas raízes é consumida pela transpiração das plantas. Assim, estimativas da transpiração da cultura possibilitam o controle mais adequado da frequência e da duração dos eventos de aplicação da solução nutritiva.

O processo de transpiração assume a função reguladora da relação entre o consumo de nutrientes e o de água pelas plantas. Desta maneira, sob condições de alta transpiração, caracterizadas por elevados valores de radiação global e do déficit de pressão de vapor d'água no ar, a demanda de água pelas plantas é intensificada em detrimento da absorção de nutrientes. Nestes momentos, a solução nutritiva, junto às raízes, deve possuir uma menor concentração para que seja mantido um adequado equilíbrio iônico.

De acordo com NELSON (1991), nos Estados Unidos e na Europa existem diferentes sistemas de monitoramento e de controle automáticos da concentração da solução nutritiva aplicada às plantas. Em geral, a solução nutritiva é preparada por sistemas de injeção de água e de soluções-estoque concentradas em um tanque de mistura, regulados para que a solução nutritiva resultante alcance um valor de condutividade elétrica preestabelecido no controlador. Portanto, a maioria destes sistemas é incapaz de responder automaticamente às modificações nas condições micrometeorológicas do

ambiente de cultivo, de maneira diferenciada e apropriada às reais necessidades das plantas. Adicionalmente, os custos de aquisição e manutenção destes sistemas são muito elevados, sendo inviáveis para a realidade dos produtores hidropônicos do Brasil, onde o desenvolvimento de tecnologias de automação de baixo custo para a aplicação em hidroponia ainda é incipiente.

O controle do preparo, da concentração da solução nutritiva, da frequência e da duração das fertirrigações com base na transpiração da cultura pode reduzir o consumo de energia elétrica, diminuir o volume de efluente (água e nutrientes) em dias nublados, contribuir significativamente na eliminação do estresse hídrico e salino em dias de elevada transpiração e melhorar sensivelmente a produtividade da cultura e a qualidade dos produtos agrícolas cultivados pela técnica da hidroponia.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo principal**

Desenvolver e avaliar um sistema computadorizado de baixo custo para o preparo e aplicação de soluções nutritivas, capaz de sincronizar a demanda e o suprimento de água e de nutrientes para plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivadas em substrato de areia sob condições de casa de vegetação.

### **2.2. Objetivos específicos**

- a) Propor, calibrar e validar circuitos eletrônicos de baixo custo, gerenciados por computador, para medição em tempo real de condutividade elétrica e temperatura de soluções nutritivas;
  
- b) Desenvolver e implementar um sistema computadorizado para o controle do preparo, da concentração, da frequência e da duração de aplicação de soluções nutritivas em cultivos hidropônicos, com base em uma estratégia que considere a condutividade elétrica da solução drenada, os dados micrometeorológicos do ambiente de cultivo, o modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith e os estádios de desenvolvimento da cultura;
  
- c) Comparar o sistema computadorizado de controle proposto com o sistema convencional, normalmente empregado nos cultivos hidropônicos existentes no Brasil, no que se refere às fertirrigações, drenagens e frutos do tomateiro cultivado em substrato de areia sob condições de casa de vegetação.

### **3. Automação aplicada ao preparo e ao manejo de soluções nutritivas em hidroponia**

#### **3.1. Introdução**

Nos cultivos hidropônicos, a maioria dos procedimentos referentes ao preparo e ao manejo das soluções nutritivas é, normalmente, executada de maneira manual, consumindo muito tempo e mão-de-obra. Especificamente, o preparo inicial da solução nutritiva e as operações diárias de um cultivo hidropônico, como a complementação do volume do reservatório de solução nutritiva com água e o ajuste da condutividade elétrica e do potencial hidrogeniônico, são exaustivas, monótonas e nem sempre realizadas adequadamente, não atendendo às reais necessidades da cultura. De acordo com MUCKLE (1995), o ajuste diário da condutividade elétrica e do potencial hidrogeniônico da solução nutritiva se constitui em um dos maiores entraves a expansão dos cultivos hidropônicos.

O preparo e o manejo de soluções nutritivas podem ser parcialmente ou totalmente automatizados com o emprego de sistemas de controle, capazes de promover uma economia considerável de tempo e mão-de-obra, além de melhorar significativamente a eficiência do uso de água, nutrientes e energia elétrica, refletindo-se em acréscimos na qualidade e na produtividade da cultura. Adicionalmente, a automação possibilita a otimização das operações e a redução do descarte de efluentes.

#### **3.2. Sistemas de controle**

Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes interconectados, capaz de realizar uma determinada operação (SCHWARZENBACH e GILL, 1992).

Em particular, um sistema é denominado de controle quando a sua saída é controlada para assumir um valor específico ou seguir uma determinada entrada (BOLTON, 1995).

De acordo com HUMPHRIES e SHEETS (1999), um sistema de controle possui entradas ou ajustes, que representam os comandos fornecidos ao sistema, perturbações ou distúrbios, que causam alterações nas variáveis

controladas, e saídas, que são as ações que devem ser executadas para manter as variáveis controladas dentro de limites preestabelecidos. A função do sistema de controle é regular os valores das variáveis controladas, quando perturbações as modificam, por meio de dispositivos atuadores.

Basicamente, existem dois tipos distintos de sistemas de controle que podem ser empregados nos processos agrícolas: sistemas de controle em malha aberta e sistemas de controle em malha fechada.

Por meio da estratégia de controle é que o sistema realiza o processo de tomada de decisão. De acordo com BOLTON (1995), existem vários tipos de estratégias de controle que podem ser adotadas conforme a aplicação. Nos sistemas em malha aberta, a estratégia de controle do tipo liga-desliga (*on-off*) é a mais utilizada. Já nos sistemas em malha fechada, as estratégias podem ser do tipo liga-desliga, proporcional, integral, derivativo ou a combinação destes como, por exemplo, proporcional-integral-derivativo.

### **3.2.1. Sistemas de controle em malha aberta**

Um sistema de controle é denominado em malha aberta quando a variável de saída não exerce influência sobre a ação de controle, ou seja, a variável de saída não é medida nem retroalimentada para ser comparada com a entrada. Neste caso, um sinal de entrada ou comando é aplicado ao controlador e o sinal de saída do controlador atua no processo, colocando a variável controlada na condição desejada (D'AZZO e HOUPIS, 1995; KUO, 1995). Na presença de distúrbios internos ou externos ao sistema, este tipo de controle não consegue realizar a operação desejada com precisão, devido à ausência de correção para os erros (OGATA, 1998).

Em um sistema de controle em malha aberta, o usuário decide previamente, por exemplo, qual o volume de solução nutritiva que será aplicado em cada planta e os horários nos quais os eventos de fertirrigação deverão ser realizados. Estas informações são programadas pelo usuário no controlador e, assim, a fertirrigação é executada com a duração e a frequência desejadas.

Normalmente, os sistemas de controle em malha aberta mais simples, aplicados aos cultivos hidropônicos, são formados por um temporizador que, em função de um intervalo de tempo preestabelecido ou de um determinado

volume de solução nutritiva que passa por um sensor de vazão, promove o acionamento/desligamento da bomba de fertirrigação (Figura 3.1).

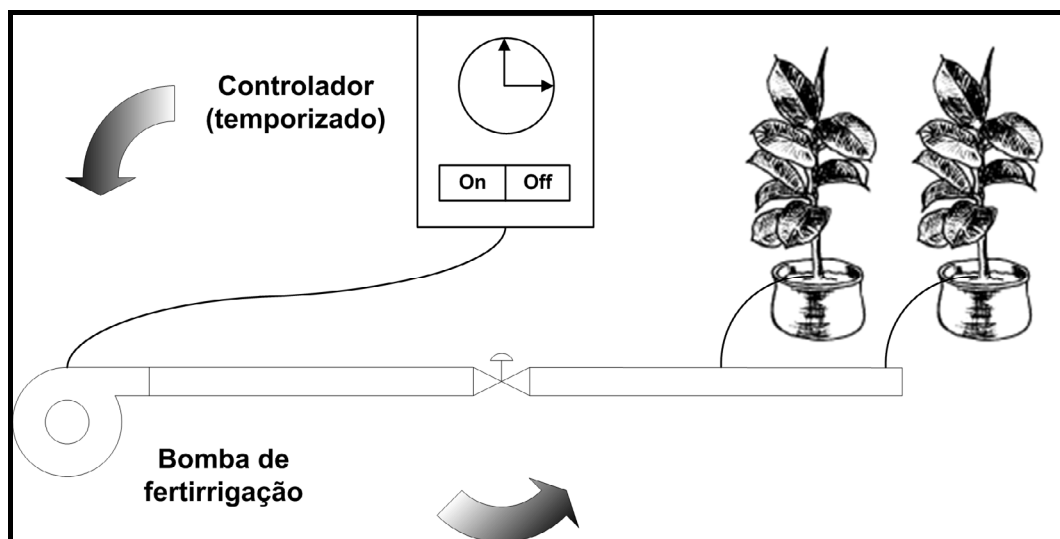


Figura 3.1. Exemplo de sistema de controle em malha aberta.

Segundo BOMAN et al. (2002), os temporizadores são simples controladores, constituídos basicamente por um dispositivo eletromecânico ou eletrônico de medição de tempo, capazes de acionar/desligar um ou mais atuadores por meio de relés eletromagnéticos. Alguns temporizadores mais sofisticados possuem funções que possibilitam o estabelecimento de um calendário de ações a serem executadas de acordo com a programação.

Em geral, a maioria dos sistemas de controle em malha aberta possui custo reduzido, sendo disponível comercialmente com distintas características e níveis de flexibilidade quanto à programação do controlador. A principal desvantagem dos sistemas em malha aberta está relacionada à incapacidade do controlador em responder automaticamente às condições ambientais (ZAZUETA et al., 2002). Adicionalmente, dependendo da aplicação, podem ser requeridos ajustes freqüentes no controlador para que a eficiência do uso de água, nutrientes e energia elétrica não sejam comprometidas.

### 3.2.2. Sistemas de controle em malha fechada

Um sistema de controle é denominado em malha fechada quando o sinal de saída exerce efeito direto sobre a ação de controle, ou seja, quando o sistema é retroalimentado. Neste caso, um sinal de erro, que é a diferença

entre o sinal de entrada e o sinal retroalimentado, é constantemente monitorado e aplicado ao controlador de modo a reduzir o erro e levar o sinal de saída para o valor desejado (DORF e BISHOP, 1998).

A principal vantagem dos sistemas de controle em malha fechada é o fato de que o uso da retroalimentação torna a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e variações internas nos parâmetros do sistema e, portanto, muito mais precisa (OGATA, 1998). Por outro lado, são mais complexos e possuem custo mais elevado (NISE, 1998; BOLTON, 1995).

Nos sistemas de controle em malha fechada, o usuário pode desenvolver e implementar estratégias de controle mais elaboradas. Uma vez definida a estratégia, o sistema de controle toma decisões em tempo real, por exemplo, a respeito da frequência mais adequada para os eventos de fertirrigação, a partir dos sinais de um ou mais sensores que alimentam ininterruptamente o controlador, por meio de um sistema de aquisição de dados (BOMAN et al., 2002).

As decisões geralmente baseiam-se em comparações, realizadas a partir da estratégia de controle, onde as condições atuais, representadas pelas medições dos sensores em tempo real, são confrontadas com as condições desejadas. Após o término do processo de tomada de decisão, tem início uma ou mais ações preventivas ou de correção executadas por atuadores (bombas de injeção, válvulas solenóides, etc.) de maneira a minimizar as diferenças entre os valores medidos e os desejados.

Uma das possibilidades para sistemas em malha fechada em cultivos hidropônicos é controlar o ajuste da concentração da solução nutritiva a ser aplicada às plantas no evento posterior de fertirrigação, com base em medições de condutividade elétrica da solução (Figura 3.2).

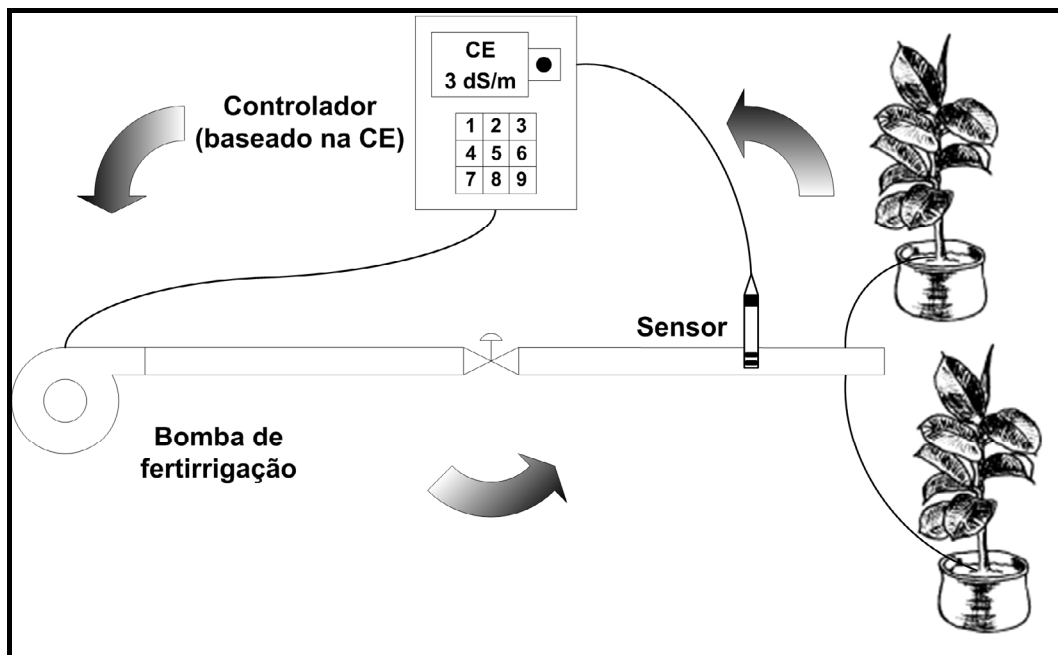


Figura 3.2. Exemplo de sistema de controle em malha fechada.

### 3.3. Sistemas computadorizados de controle aplicados à hidroponia

Sistemas de controle em malha aberta ou malha fechada, baseados em um computador, consistem de uma combinação de *hardware* e *software* que atuam como supervisores e gerenciadores das operações executadas nos cultivos hidropônicos.

Dentre as vantagens da utilização do computador, destaca-se a possibilidade de controlar, ao mesmo tempo, diversas malhas abertas e/ou fechadas com um único computador. Além disso, modificações e ajustes mais simples no sistema de controle podem ser realizados atuando-se diretamente no programa computacional (*software*) e não na estrutura física (*hardware*) (NISE, 1998).

De acordo com BOMAN et al. (2002), o processo de tomada de decisão, relacionado aos comandos do sistema computadorizado, é realizado a partir de um conjunto de operações lógicas que constituem o algoritmo da estratégia de controle implementado no programa computacional. Nos sistemas computadorizados, a estratégia de controle pode ser elaborada com diferentes níveis de complexidade, variando desde um simples controle temporizado até a utilização de sofisticados modelos de estimativa e de simulação alimentados por sensores, para decidir as ações de controle.

Nos sistemas computadorizados de controle em malha fechada, os sinais elétricos provenientes dos sensores são aplicados em uma placa de aquisição de dados conectada ao computador, sendo a mesma responsável pela conversão analógica-digital destas medições. As informações coletadas podem ser processadas por meio do programa computacional, empregadas na retroalimentação da estratégia de controle, armazenadas em unidades de disco rígido ou flexível e exibidas graficamente na tela do monitor, permitindo ao usuário acompanhar, em tempo real, as oscilações dos valores das variáveis monitoradas (ZAZUETA et al., 2002).

Um sistema computadorizado de controle, projetado e implementado adequadamente, é capaz de executar o preparo e o manejo da solução nutritiva em cultivos hidropônicos de maneira bastante eficiente, sem a necessidade de intervenções. Entretanto, inspeções regulares por usuários especializados e treinados podem prevenir sérios problemas no sistema.

### **3.4. Sistemas comerciais de controle aplicados à hidroponia**

No comércio internacional, estão disponíveis sistemas de controle especialmente desenvolvidos para automatizar os procedimentos de preparo e manejo de soluções nutritivas em cultivos hidropônicos. Estes sistemas apresentam diferentes características construtivas, elevados níveis de complexidade e altos custos de aquisição e de manutenção.

Os componentes integrantes dos sistemas comerciais podem ser painéis de controle microprocessado, temporizadores, filtros, injetores de soluções concentradas, bombas centrífugas, válvulas solenóides, dentre outros. Adicionalmente, sensores podem monitorar diversas variáveis, tais como: condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, nível de solução nos reservatórios, umidade do substrato, temperatura da solução nutritiva, oxigênio dissolvido na solução, pressão e vazão nas tubulações, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar, radiação solar global, etc.

Em razão da reduzida inércia dos cultivos hidropônicos, no que se refere à retenção de água e nutrientes pelas raízes das plantas, a ocorrência de falhas no sistema de controle e/ou a falta de energia elétrica, principalmente nos horários tipicamente mais quentes do dia, podem causar danos

irreversíveis à cultura. Por isso, é preciso ter meios preventivos para manter o sistema funcionando, ainda que parcialmente.

O sistema de controle *Multi-Feed* (Argus Control Systems, British Columbia, Canada) é um exemplo de equipamento destinado ao controle de todas as operações relacionadas ao preparo e ao manejo de soluções nutritivas em cultivos hidropônicos (Figura 3.3).

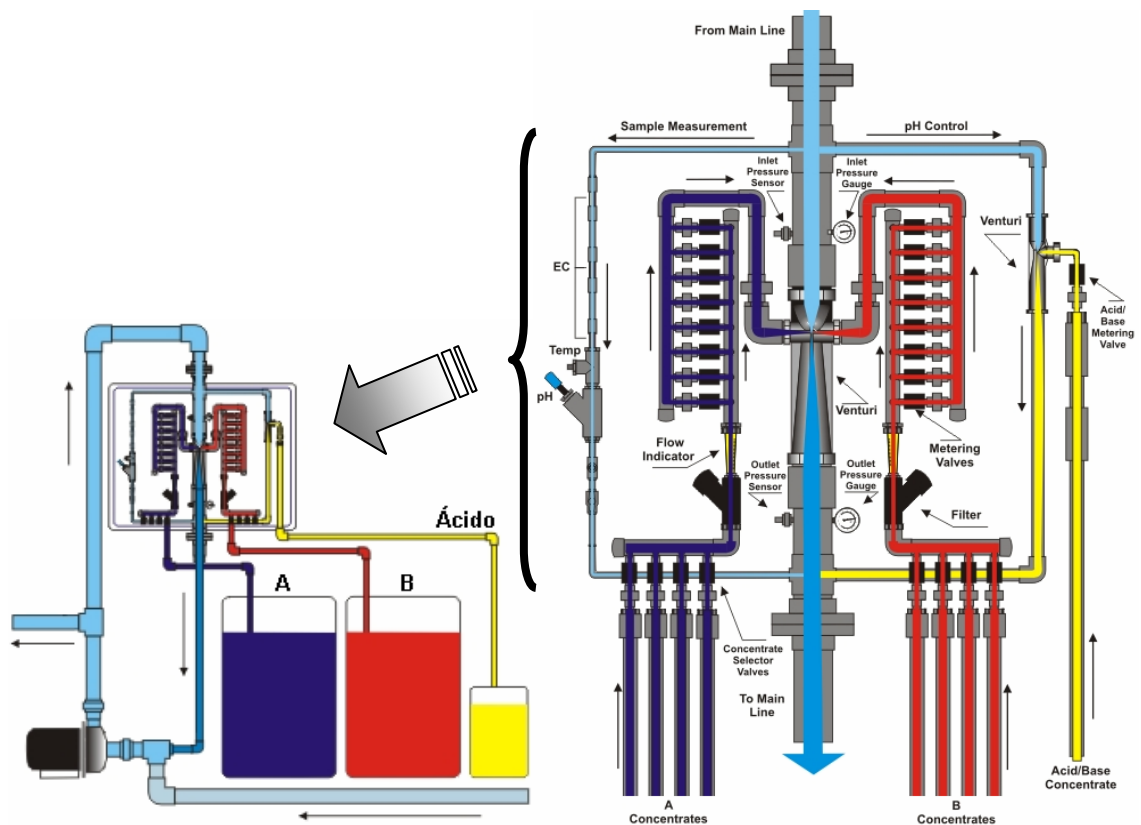


Figura 3.3. Sistema de controle *Multi-Feed* (Argus Control Systems) para fins de cultivo hidropônico.

### 3.5. Sensores

Os sensores são componentes extremamente importantes nos sistemas de controle em malha fechada, pois fornecem informações essenciais para o processo de tomada de decisão. Por definição, segundo TAYLOR (1997), sensores são dispositivos que, sob a ação de grandezas físicas, geram sinais analógicos ou digitais.

### 3.5.1. Sensores de condutividade elétrica

A condutividade de uma solução eletrolítica é definida como a capacidade desta em conduzir corrente elétrica. A unidade de condutividade elétrica no Sistema Internacional (SI) é o deciSiemens por metro ( $\text{dS m}^{-1}$ ), equivalente a miliSiemens por centímetro ( $\text{mS cm}^{-1}$ ), sendo esta freqüentemente empregada para expressar a condutividade de soluções aquosas como, por exemplo, as utilizadas nos cultivos hidropônicos.

O princípio no qual a maioria dos equipamentos de medida de condutividade elétrica se baseia, consiste na medida de tensão quando uma corrente alternada é aplicada em dois eletrodos de uma célula de condutividade elétrica imersa em uma solução eletrolítica. Assim, os cátions migram para o eletrodo negativo, os ânions migram para o eletrodo positivo e a solução atua como um condutor elétrico transportando carga por meio destes íons (RADIOMETER ANALYTICAL, 2007).

Basicamente, uma célula de condutividade elétrica consiste em dois cilindros metálicos concêntricos (eletrodos), cujas áreas e distância são precisamente preestabelecidas, montados rigidamente numa cavidade construída em material isolante, vidro ou plástico. Essa cavidade serve para delinear um reduzido volume de solução eletrolítica a ser medida e, conseqüentemente, tornar a medição de condutividade independente do volume total da amostra e da proximidade de superfícies tais como as paredes de reservatórios ou tubulações (ANALION, 2007).

O termo resistividade elétrica é freqüentemente associado à condutividade, pois quando dois eletrodos forem imersos em uma solução, existirá maior ou menor resistência à passagem de corrente elétrica, dependendo da concentração da solução (STEIDLE NETO et al., 2005). A relação entre resistividade elétrica e condutividade é inversamente proporcional.

Em função da necessidade de se aplicar uma tensão de corrente alternada nos eletrodos da célula, é imprescindível a utilização de um sistema de aquisição de dados relativamente rápido, pois a freqüência de aquisição de dados precisa ser superior à freqüência da tensão aplicada nos eletrodos. Desta maneira, é possível quantificar com precisão o efeito da concentração total de sais na condutividade elétrica.

De acordo com ZOLNIER (2004), existem diferentes métodos para a medição da condutividade elétrica de uma solução. Certos equipamentos mantêm a frequência da onda constante e medem a condutividade pela alteração na tensão elétrica entre os eletrodos. Outro método consiste na retificação da onda, ou seja, na transformação da tensão de corrente alternada em tensão de corrente contínua por meio de um dispositivo eletrônico, o que aumenta, inevitavelmente, os custos do sistema de medição. Neste caso, é possível utilizar um sistema com baixa frequência de aquisição de dados. Existem ainda equipamentos que operam de maneira oposta à mencionada anteriormente, mantendo a tensão ou corrente aproximadamente constante e medindo o efeito da condutividade elétrica na própria frequência da onda. Entretanto, a frequência da tensão aplicada nos eletrodos da célula não deve ser reduzida drasticamente para evitar o problema da polarização dos eletrodos. Esse último método tem como grande vantagem o fato de não necessitar de um sistema de aquisição de dados, pois a condutividade elétrica pode ser medida diretamente por meio da porta paralela de um simples computador.

Dentre os principais fatores que podem influenciar as medições de condutividade elétrica, destacam-se a geometria da célula de condutividade, a polarização dos eletrodos, as propriedades elétricas do cabo conectado à célula e a temperatura da solução iônica (RADIOMETER ANALYTICAL, 2007).

No que se refere à geometria da célula de condutividade, o espaçamento (L) e a área (A) dos eletrodos são as dimensões mais importantes, pois a razão  $L/A$  determina a constante da célula (K), afetando os valores de condutividade elétrica medidos pela célula (COLE-PARMER, 2007).

A constante da célula de condutividade pode ser modificada com o tempo devido à contaminação ou a alteração físico-química, no caso de células cujos eletrodos são platinados (RADIOMETER ANALYTICAL, 2007). A Tabela 3.1 apresenta diferentes constantes da célula, de acordo com a faixa de condutividade elétrica a ser medida. Segundo WALKER (2004), as células de condutividade elétrica normalmente utilizadas em aplicações agrícolas possuem constante (K) igual a  $1 \text{ cm}^{-1}$ .

Tabela 3.1. Constantes da célula de condutividade conforme a faixa de medição.

Constante da célula ( $\text{cm}^{-1}$ )	Faixa de condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ )
0,01	0,000055 - 0,02
0,1	0,0005 - 0,2
1	0,01 - 2
10	1 - 200

Fonte: COLE-PARMER (2007).

Ao imergir os eletrodos de uma célula de condutividade elétrica em uma solução, deseja-se medir somente a resistência da solução à passagem de corrente elétrica. Entretanto, uma resistência adicional provocada pela polarização dos eletrodos pode interferir nas medidas causando erros. De acordo com RADIOMETER ANALYTICAL (2007), a utilização de tensão de corrente alternada de baixa amplitude nos eletrodos, o ajuste da frequência conforme a faixa de condutividade elétrica a ser medida e o revestimento dos eletrodos com negro de platina, constituem-se em formas eficientes de minimizar os efeitos da polarização.

A resistência elétrica do cabo conectado ao corpo da célula de condutividade pode provocar erros nas medições quando a resistência da solução é baixa (inferior a  $50 \Omega$ ), ou seja, em solução de condutividade elétrica elevada (superior a  $20 \text{ dS m}^{-1}$ ). De maneira contrária, a capacitância do cabo influencia medidas de baixa condutância (inferiores a  $4 \mu\text{S}$ ). Para impedir este problema, a capacitância do condutor deve ser menor que  $350 \text{ pF}$  (RADIOMETER ANALYTICAL, 2007).

A condutividade elétrica é dependente da temperatura de maneira diretamente proporcional, ou seja, se a temperatura aumenta, a resistência da solução à passagem de corrente diminui, resultando em acréscimo na condutividade e vice-versa (WTW, 2002). Este efeito é devido ao fato de que a mobilidade individual dos íons aumenta com a temperatura. Portanto, medidas de temperatura da solução devem ser realizadas simultaneamente às de condutividade elétrica para fins de compensação. Normalmente, estas medidas são obtidas por meio de um sensor do tipo termistor com coeficiente de temperatura negativo (NTC), incluso no interior da célula de condutividade elétrica. Ressalta-se que, ao se fazer referência sobre a condutividade elétrica

de uma solução, deve-se sempre reportar à temperatura de 25 °C para fins de padronização (COLE-PARMER, 2007).

Nos cultivos hidropônicos, a absorção de nutrientes pelas raízes é influenciada pelo ambiente externo à planta e está sob o controle fisiológico exercido pelos mecanismos de regulação interna da planta (ANDRIOLO, 1999). Assim, ao longo do crescimento, a concentração dos nutrientes que compõem a solução hidropônica sofre variações, resultando em decréscimos na disponibilidade de nutrientes para as plantas. Por esse motivo, a manutenção de um meio favorável ao pleno crescimento e desenvolvimento das plantas requer o monitoramento contínuo da solução nutritiva (STEIDLE NETO et al., 2005).

Como a absorção de nutrientes pelas plantas é quantitativamente diferenciada, a técnica mais avançada para o controle da concentração da solução nutritiva baseia-se na medição individualizada da concentração de cada um dos nutrientes presentes na solução por meio de sensores de íons específicos, que permitem a reposição precisa de cada nutriente. Entretanto, de acordo com VAN OS et al. (2002), medições *in situ* e em tempo real das concentrações individuais dos nutrientes apresentam custos muito elevados, sendo indicadas apenas para culturas cujo valor econômico justifique o investimento nestes sensores.

Atualmente, a técnica mais empregada para o controle da concentração da solução nutritiva, devido ao custo relativamente baixo e a praticidade, baseia-se na medição de condutividade elétrica, que fornece de maneira indireta a quantidade total de íons dissolvidos na solução. O manejo da concentração da solução nutritiva pode ser realizado considerando o critério de manutenção da condutividade elétrica, proposto por FURLANI et al. (1999), mediante a adição de soluções-estoque de ajuste com composições químicas que apresentem uma relação entre os nutrientes semelhante à extraída pelas plantas.

Ao controlar a concentração da solução nutritiva em cultivos hidropônicos fechados por meio da condutividade elétrica, é importante que a solução seja completamente renovada (ao menos a cada mês), a fim de evitar problemas de deficiência e/ou toxicidade, particularmente no que se refere aos micronutrientes (HOCHMUTH, 2001a). Como o restabelecimento da concentração desejada é realizado pela adição de soluções-estoque de ajuste,

onde todos os nutrientes são repostos em proporções iguais às da solução inicial, o procedimento de renovação reduz o acúmulo e o desbalanceamento da solução nutritiva (MARTINEZ e SILVA FILHO, 2004).

Sensores de medição de condutividade elétrica, associados a sistemas computadorizados de aquisição de dados, possibilitam o monitoramento em tempo real das variações na concentração da solução nutritiva aplicada às plantas ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. Em sistemas de controle em malha fechada, medições de condutividade elétrica podem ser utilizadas na retroalimentação da estratégia de controle, tornando possível o ajuste automático da concentração da solução conforme desejado.

### **3.5.2. Sensores de pH**

O potencial hidrogeniônico (pH) de uma solução está diretamente relacionado às concentrações de íons hidrogênio ( $H^+$ ) e íons hidróxido ( $OH^-$ ) presentes nesta solução. A escala de pH varia de 0 a 14, sendo que pH 7 corresponde a neutralidade, ou seja, o número de íons  $H^+$  na solução é igual ao de  $OH^-$ . Valores de pH acima de 7 indicam alcalinidade, havendo nesta condição, predomínio de íons  $OH^-$  sobre íons  $H^+$ . Ao contrário, quando o número de íons  $H^+$  é superior ao de  $OH^-$  tem-se caracterizada a acidez da solução, onde o pH é inferior a 7 (MALAVOLTA, 1980).

A medição do pH de uma solução pode ser realizada por colorimetria ou potenciometria. No método colorimétrico são utilizados indicadores, cuja cor varia de maneira bastante definida em função da concentração hidrogeniônica da solução (MALAVOLTA, 1981). O segundo método é caracterizado pela comparação do potencial de duas soluções, sendo que uma consiste na solução onde se deseja medir o pH e a outra em uma solução com potencial conhecido, denominada de solução de referência. O sinal gerado pelo eletrodo de pH é a tensão elétrica medida entre a solução de referência, situada no interior do eletrodo, e a solução externa, a qual se deseja conhecer o pH (ZOLNIER, 2004).

A temperatura da solução eletrolítica, na qual o eletrodo de pH está inserido, exerce influência direta sobre os valores de pH medidos (COLLEPARMER, 2000). Em função deste efeito, medidas de temperatura da solução devem ser realizadas simultaneamente às de pH para fins de compensação.

Em cultivos hidropônicos, o ajuste de pH da solução nutritiva é ainda mais importante comparativamente à correção de pH do solo (MUCKLE, 1995). De acordo com MARTINEZ e SILVA FILHO (2004), a maioria dos nutrientes é melhor absorvida pelo sistema radicular das plantas quando o pH da solução nutritiva ou do meio de cultivo está entre 5,5 e 6,5.

O efeito do pH sobre o crescimento de plantas cultivadas com solução nutritiva pode ser direto ou indireto (MARTINEZ, 1999). O efeito direto resulta da ação de íons  $H^+$  ou  $OH^-$  sobre as membranas das células das raízes. Em pH inferior a 4, a elevada concentração hidrogeniônica afeta a integridade e a permeabilidade das membranas celulares, podendo ocasionar perda de nutrientes já absorvidos. Nesta situação, o crescimento das raízes é reduzido e a exigência em cálcio aumenta para manter um crescimento satisfatório (MOORE, 1974). Por outro lado, o efeito indireto do pH está associado à solubilidade de nutrientes. ZIESLIN (1994) recomenda manter o pH da solução nutritiva com uma certa acidez, pois se o mesmo estiver acima de 6,5 pode ocorrer precipitação de determinados nutrientes como cálcio, ferro, fósforo e manganês que deixariam de estar disponíveis para a absorção das plantas.

As variações de pH que ocorrem na solução nutritiva são reflexos da absorção diferenciada de cátions e ânions. Por isso, o controle de pH da solução nutritiva em cultivos hidropônicos é essencial para garantir às culturas plena disponibilidade de macro e micronutrientes em quantidades adequadas ao crescimento e desenvolvimento (HOCHMUTH, 2001a). Este controle pode ser realizado mediante a adição manual ou automática de ácidos (sulfúrico, fosfórico, nítrico ou clorídrico) ou bases fortes (hidróxido de sódio, de potássio ou de amônio) para diminuir ou aumentar o pH da solução, respectivamente (FURLANI et al., 1999).

SPINU et al. (1998) afirmam que o controle de pH dentro de uma faixa estreita, próxima da neutralidade, é muito difícil de ser implementado com a aplicação de reagentes visto que, quando soluções concentradas básicas ou ácidas são utilizadas, um excesso, ainda que em quantidade reduzida, causa grande variação no pH. Visando aprimorar o controle automático, SPINU et al. (1998) propuseram uma nova tecnologia, na qual o pH da solução nutritiva é ajustado por meio da decomposição ou geração eletroquímica *in situ* da água em íons  $H^+$  e  $OH^-$ , sendo realizada com células eletroquímicas. Estas células possuem uma membrana de troca de íons que as divide em dois

compartimentos (catodo e ânodo), onde os íons são gerados conforme a acidez ou alcalinidade da solução nutritiva. Dentre as vantagens dessa tecnologia, destacam-se o monitoramento e o controle mais precisos de pH, a melhoria na qualidade da água utilizada no preparo e na reposição da solução nutritiva, a eliminação da possibilidade de dosagem em excesso de reagentes e a desnecessidade de reservatórios para o armazenamento de ácidos e bases.

Segundo JONES JR. (1983), uma considerável diminuição no controle de pH da solução nutritiva pode ser alcançada pela simples escolha da relação entre os íons de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), quando do preparo das soluções-estoque concentradas. Se a relação nitrato/amônio for maior do que 9:1, o pH da solução nutritiva, preparada a partir das soluções-estoque concentradas, tende a aumentar com o tempo. Entretanto, para relações menores ou iguais a 8:1, o pH decresce com o tempo.

### **3.5.3. Sensores de nível**

A utilização de sensores de nível no reservatório de solução nutritiva permite que a reposição do volume de água consumido pelas plantas seja realizada automaticamente, por meio do acionamento de uma válvula hidráulica ou eletrônica, até que o nível seja restabelecido.

Sensores de nível podem ser usados em conjunto com condutivímetros e/ou peagômetros em sistemas computadorizados de controle, possibilitando não somente a reposição de água mas, também, dos nutrientes absorvidos pelas plantas, de maneira eficiente e adequada às reais necessidades da cultura.

O principal entrave ao emprego de sensores de nível, instalados no interior do reservatório de solução nutritiva, está relacionado à condensação e deposição de sais sobre os elementos sensíveis. Este problema pode ser eliminado com a utilização de sensores capacitivos de proximidade, caracterizados por não manterem contato físico com a solução contida no reservatório, pois são fixados na parte externa do tanque. O princípio de funcionamento destes sensores baseia-se na variação de capacitância conforme a presença ou não de líquido na altura preestabelecida, sendo regulados para desprezar a parede do reservatório.

### 3.6. Sistemas de injeção de soluções nutritivas concentradas

As operações associadas ao preparo de soluções nutritivas podem ser automatizadas utilizando-se sistemas de injeção associados a controladores.

A finalidade de um sistema de injeção é incorporar, dosando de maneira precisa e adequada, uma ou mais soluções-estoque concentradas na água de irrigação. Estes injetores podem promover uma economia significativa de mão-de-obra nas operações de dosagem de soluções concentradas.

De acordo com MONTAG (1999), os sistemas de injeção de soluções concentradas na água de irrigação podem ser classificados em dois grupos:

- **Quantitativos ou Não-proporcionais:** caracterizados pelo decréscimo na concentração da solução-estoque com o tempo, na medida em que os eventos de fertirrigação são realizados;
- **Proporcionais:** caracterizados pela inalteração na concentração da solução-estoque com o tempo, sendo adicionada a taxas constantes e proporcionais na água de irrigação na medida em que os eventos de fertirrigação são realizados.

Em função dos sistemas de injeção quantitativos não serem recomendados para cultivos hidropônicos, devido a limitação no controle da concentração da solução nutritiva aplicada às plantas, serão descritos os principais sistemas de injeção por pressão positiva e por pressão negativa, classificados como proporcionais.

#### 3.6.1. Sistemas de injeção por pressão positiva

Os sistemas de injeção por pressão positiva são caracterizados por removerem a solução-estoque concentrada de um reservatório não pressurizado e incorporá-la na tubulação principal que conduz a água de irrigação, sempre com pressão superior à existente nessa tubulação (PIZARRO, 1996). Estes injetores podem ser acionados por energia elétrica ou hidráulica (aproveitando a água na tubulação de fertirrigação como força motriz).

Apesar de não serem específicas para fins de fertirrigação, as bombas centrífugas podem ser empregadas para a injeção de soluções concentradas

na água de irrigação (Figura 3.4). Para uma bomba centrífuga operar como um injetor é necessário que a pressão produzida pela mesma seja maior do que a existente no ponto de injeção. Entretanto, a taxa de injeção de solução concentrada depende da pressão da rede de abastecimento de água. Assim, alta pressão na tubulação de água resulta em uma taxa de injeção baixa e vice-versa. Por essa razão, é preciso que seja realizada uma calibração, mantendo-se a bomba em funcionamento e controlando-se a pressão e a vazão na tubulação de água até que a condutividade elétrica da solução nutritiva a jusante seja igual a desejada (HAMAN et al., 2003b).

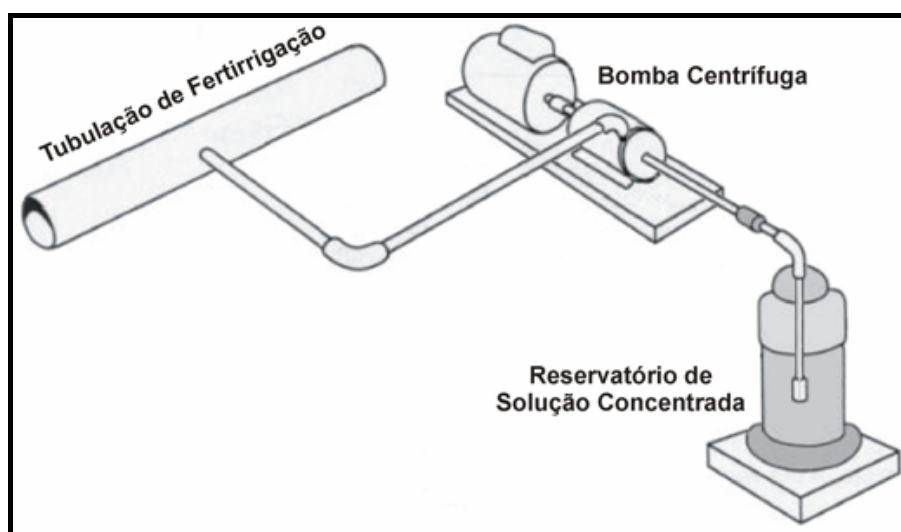


Figura 3.4. Bomba centrífuga operando como injetor de solução concentrada.

Existem no comércio bombas centrífugas de diferentes portes e custos. Para fins hidropônicos, as bombas normalmente empregadas, não somente para a injeção de solução concentrada como para a circulação da solução nutritiva no meio de cultivo, possuem potência abaixo de 500 W, devido à reduzida diferença de altura entre a sucção e o recalque.

Bombas centrífugas de pequeno porte podem ser empregadas para a injeção de água, soluções-estoque concentradas, ácidos e bases em um reservatório de preparo de solução nutritiva, realizando a dosagem precisa de maneira automática. Nesse sentido, as eletrobombas de drenagem (bombas usadas em máquinas de lavar roupa) e as eletrobombas de partida a frio (bombas de injeção de combustível em automóveis) são opções com custo bastante reduzido, que podem ser perfeitamente aplicadas na automação de cultivos hidropônicos (Figura 3.5).

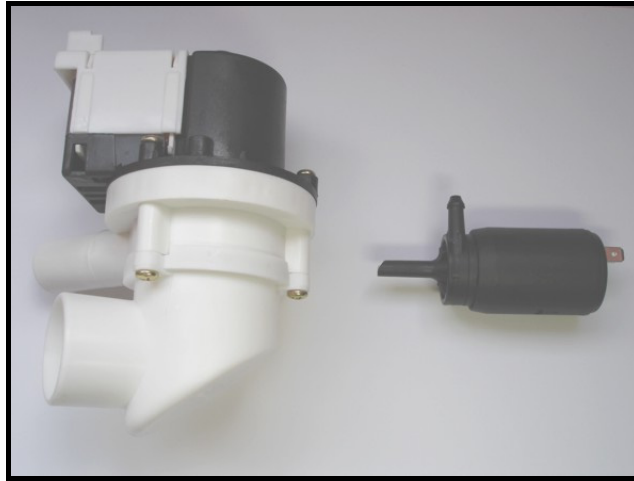


Figura 3.5. Eletrobomba de drenagem (esquerda) e eletrobomba de partida a frio (direita).

As bombas do tipo diafragma constituem-se nos injetores de solução concentrada mais comumente empregadas em aplicações agrícolas, sendo fabricadas com materiais resistentes à corrosão.

De acordo com NATHAN (1994), uma bomba do tipo diafragma é constituída basicamente de uma câmara metálica, que contém internamente um diafragma de ação simples ou dupla conectado a uma haste, e de duas válvulas (admissão e descarga). Inicialmente, o acionamento da haste no sentido ascendente diminui a pressão no interior da câmara, provocando uma sucção na face inferior do diafragma. Neste momento, a solução concentrada é aspirada para dentro da câmara pela válvula de admissão. Ao término da sucção, tem início a ação contrária da haste, gerando um aumento de pressão no interior da bomba. Desta maneira, a válvula de admissão é fechada e a válvula de descarga é aberta, fazendo com que o volume do fluido aspirado seja forçado a sair e misturado à água de irrigação (Figura 3.6).

Além da facilidade no manuseio, custo relativamente baixo e vida útil extensa, as bombas do tipo diafragma possuem a vantagem de que as únicas partes móveis que entram em contato com a solução concentrada são o diafragma e as válvulas de admissão e descarga. Assim, estes injetores são apropriados para incorporar soluções corrosivas de alta concentração, como as soluções-estoque utilizadas em cultivos hidropônicos, na água de irrigação (HAMAN et al., 2003a).

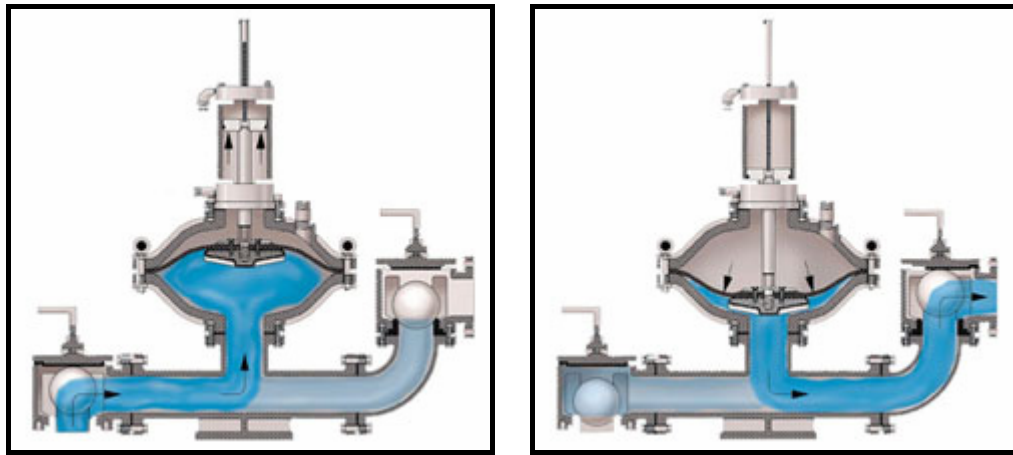


Figura 3.6. Bomba injetora do tipo diafragma executando a sucção (esquerda) e a descarga da solução-estoque concentrada (direita).

A desvantagem deste injetor está associada ao fato de que ocorrem variações na aplicação de solução concentrada quando a fonte de energia propulsora sofre alterações (BURT et al., 1995). Para assegurar que a taxa de injeção de solução concentrada seja realmente proporcional, em bombas acionadas por energia elétrica, é possível utilizar um sensor de vazão, posicionado na tubulação de água à montante da bomba, e com base nesta vazão ajustar automaticamente o injetor ou o tempo de injeção (ZAZUETA et al., 2002).

As bombas injetoras do tipo pistão são bastante precisas, podendo ser dotadas de um, dois ou mais pistões acoplados a bielas fixadas em roldanas.

Neste tipo de injetor, em cada ciclo completo do pistão, determinado volume de solução concentrada é aspirado para o interior da bomba através da válvula de sucção, preenchendo a câmara que envolve o pistão. Enquanto a solução concentrada é succionada, a válvula de descarga permanece fechada em razão da diferença de pressão entre o interior e o exterior da câmara. Quando o pistão executa o movimento no sentido contrário, o volume aspirado é injetado na tubulação de água através da válvula de descarga, promovendo a mistura (Figura 3.7).

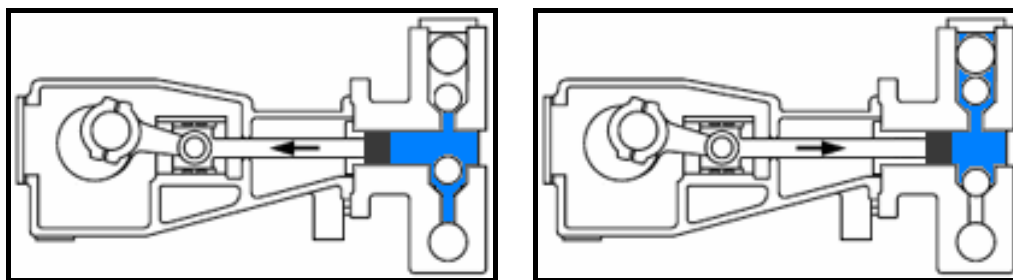


Figura 3.7. Bomba injetora do tipo pistão executando a sucção (esquerda) e a descarga da solução-estoque concentrada (direita).

Segundo YEAGER e HENLEY (1986), a desvantagem das bombas injetoras que possuem um pistão de ação simples é que sempre existirá um intervalo de tempo separando cada ciclo. Com isso, a uniformidade de aplicação da solução concentrada pode ser afetada. Este problema é solucionado com a utilização de bombas que possuem um pistão de ação dupla, no qual o volume em ambos os lados do pistão é usado para bombear a solução concentrada. Entretanto, como a oscilação na taxa de injeção é muito rápida em bombas com pistão de ação simples, esta variação não restringe a aplicação deste tipo de injetor em cultivos hidropônicos.

Diferentemente das demais bombas do tipo pistão, no injetor de fertilizantes *Dosatron* (Dosatron International, Bordeaux, France) a incorporação da solução concentrada na água de irrigação ocorre no interior do próprio equipamento, em uma câmara de homogeneização (Figura 3.8).

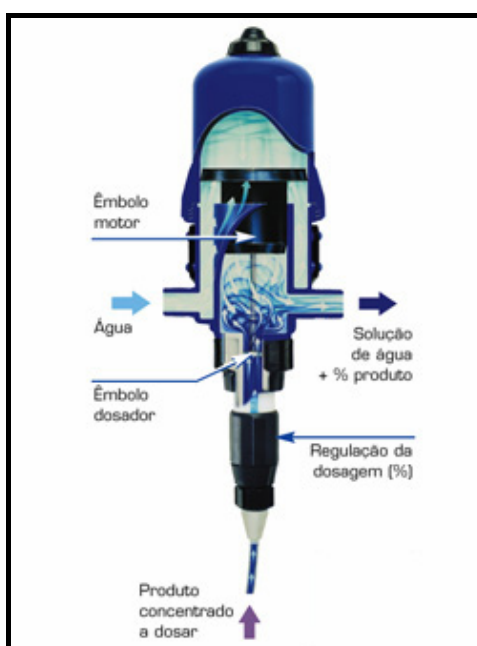


Figura 3.8. Princípio de funcionamento do injetor de fertilizantes *Dosatron*.

A dosagem da solução concentrada no injetor *Dosatron* é constante, de acordo com a regulagem feita pelo usuário, rigorosamente proporcional ao volume de água que atravessa o equipamento, sejam quais forem as variações de vazão da rede de abastecimento de água que atua como força motriz de acionamento do pistão (êmbolo motor).

No comércio existem bombas de injeção, acionadas por energia elétrica, nas quais a ação de um pistão exerce esforços de um óleo ou outro fluido sobre um diafragma, resultando em deslocamento da solução concentrada. A principal vantagem destas bombas é a combinação de alta precisão com a resistência a soluções corrosivas, típicas das bombas de pistão e diafragma, respectivamente (BOMAN et al., 2004).

### **3.6.2. Sistemas de injeção por pressão negativa**

FRIZZONE e BOTREL (1994) afirmam que estes sistemas de injeção são caracterizados pela sucção e incorporação da solução-estoque concentrada na água de irrigação, por meio da pressão negativa gerada pela transformação da energia de pressão da água que atravessa o injetor em energia cinética. O acionamento destes injetores é sempre realizado aproveitando a própria energia da água.

Os injetores do tipo Venturi são fabricados em polipropileno, PVC ou metal com diferentes dimensões, sendo constituídos por uma seção convergente gradual, seguida de um estrangulamento e de uma seção divergente gradual (Figura 3.9). A redução no diâmetro da tubulação causa perda de carga (queda de pressão) e aumento de velocidade neste ponto, ocasionando pressão negativa (vácuo parcial) no local do estrangulamento. Esse vácuo é o responsável pela sucção e incorporação da solução concentrada, contida em um reservatório não pressurizado, ao fluxo de água. A maioria dos injetores do tipo Venturi requer um diferencial de pressão inferior a 20% para iniciar o vácuo (HAMAN et al., 2003b).

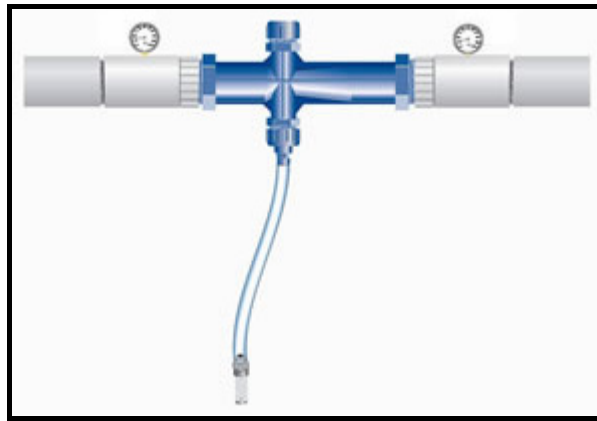


Figura 3.9. Injetor do tipo Venturi para a aplicação de solução-estoque concentrada na água de irrigação.

Quanto à instalação, o Venturi pode ser conectado em paralelo a tubulação principal de água, utilizando-se uma derivação de menor diâmetro tipo *by-pass*, ou instalado diretamente na tubulação de fertirrigação o que, segundo FEITOSA FILHO et al. (1997), pode ocasionar perdas de carga na tubulação da ordem de 30 a 50% da pressão de serviço. Todavia, as perdas de carga ocorridas na tubulação de água, em função da instalação do tipo *by-pass*, podem ser minimizadas por meio da utilização de uma pequena bomba (*booster*), conforme mostrado na Figura 3.10, capaz de proporcionar a pressão extra necessária ao funcionamento do Venturi (TRANI e CARRIJO, 2004).

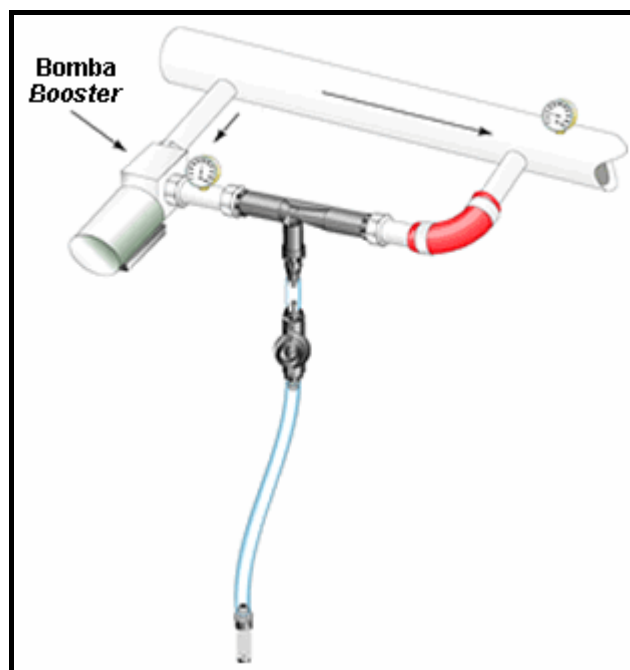


Figura 3.10. Injetor do tipo Venturi com bomba *booster* para a aplicação de solução-estoque concentrada na água de irrigação.

Dentre as principais vantagens deste tipo de injetor, destacam-se a resistência a soluções corrosivas, baixo custo comparado aos demais injetores, simplicidade de operação e eficiência satisfatória (ZANINI et al., 2002).

A taxa de injeção de solução concentrada varia proporcionalmente com a pressão da água que atravessa o Venturi. Assim, controlando-se a pressão, a taxa de aplicação torna-se constante. Outro aspecto importante, trata-se da manutenção na capacidade de sucção do Venturi, que depende de manter o nível de solução-estoque no reservatório sempre constante (HAMAN et al., 2003b).

Os injetores do tipo sifão são pequenas válvulas metálicas que funcionam com base no diferencial de pressão entre a tubulação de água e o reservatório de solução-estoque. Esse diferencial é o responsável pela sucção e mistura da solução concentrada com a água (Figura 3.11).

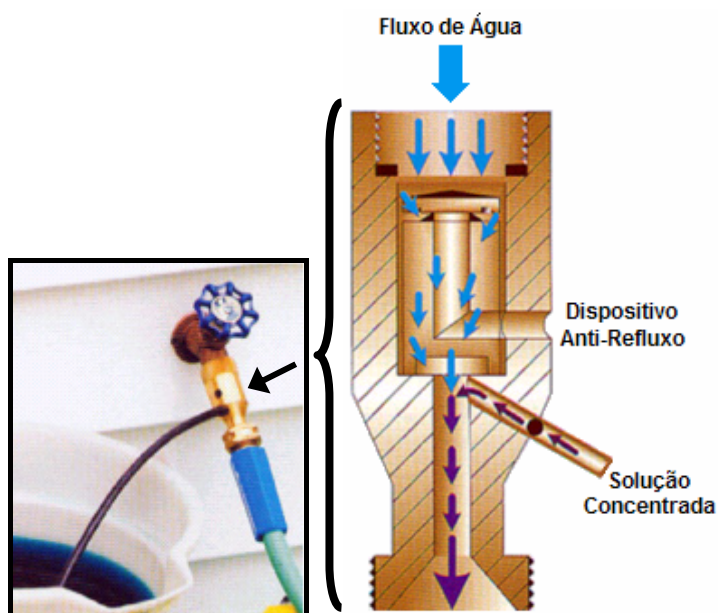


Figura 3.11. Injetor do tipo sifão fabricado pela Hozon™ com taxa de injeção fixa.

Estes injetores possuem custo muito reduzido, baixo requerimento de manutenção, além de dispositivos que impedem o refluxo da solução concentrada para o reservatório. Entretanto, flutuações na pressão da água que alimenta o injetor resultam em variações significativas na quantidade succionada de solução concentrada (PENNISI e KESSLER, 2003).

A pressão mínima na tubulação de água para o acionamento do injetor do tipo sifão é de 2,4 bar, aproximadamente. A distância do injetor até o ponto

final de aplicação da solução diluída não deve ser superior a 15 m para que o funcionamento do mesmo não seja comprometido.

Para controlar, de maneira automática, um sistema de injeção acionado hidráulicamente, é necessário a utilização de válvulas solenóides, que são abertas e fechadas eletronicamente a partir de um temporizador, microprocessador ou computador executando um algoritmo de controle.

## **4. Material e Métodos**

### **4.1. Circuitos eletrônicos para medição de condutividade elétrica e temperatura de soluções nutritivas**

Os circuitos para medição de condutividade elétrica e temperatura de soluções nutritivas, constituídos por componentes eletrônicos de baixo custo, foram montados em uma matriz de contato (*Pront-Board*), sendo posteriormente transferidos para uma placa de circuito impresso. Quando alimentados por uma fonte de corrente contínua, obteve-se nos terminais de saída dos circuitos sinais alternados, cujas freqüências de oscilação medidas foram relacionadas aos valores verdadeiros de um dos resistores de cada circuito. Desta maneira, de acordo com STEIDLE NETO e ZOLNIER (2006), fez-se um estudo preliminar a fim de estabelecer relações entre freqüência e resistência, pesquisando como a variação no valor do resistor em cada circuito afetou a freqüência medida nos terminais de saída do respectivo circuito. Estas relações foram estabelecidas mediante à substituição do resistor de valor fixo em cada circuito por outros de valores ôhmicos conhecidos e medindo-se, individualmente, as freqüências associadas. Para o circuito de condutividade elétrica, a variação no valor ôhmico do resistor simulou maior ou menor resistência à passagem de corrente elétrica em uma solução eletrolítica.

#### **4.1.1. Medição de resistência elétrica**

Inicialmente, determinou-se os valores ôhmicos verdadeiros dos resistores a serem utilizados para a obtenção das relações entre freqüência e resistência. Assim, foram adquiridos resistores de carvão ( $\frac{1}{4}$  W) da série comercial com valores ôhmicos nominais variando de 100 a 10.000  $\Omega$ , totalizando 29 resistores. O equipamento empregado na medição do valor ôhmico verdadeiro de cada resistor foi a Ponte de Thomson (modelo YTW, Ganz, Budapest) que possibilita a determinação do valor ôhmico exato de resistores com resolução de uma casa decimal. Além da Ponte de Thomson, foram necessários um galvanômetro analógico calibrado (Fisher Scientific, Chicago, IL) e uma fonte de tensão regulável de 0 a 30 Vcc (modelo 2025, Labo, São Paulo, SP). Nas medidas de resistência efetuadas com a Ponte de

Thomson, os efeitos causados pelas resistências de contato, assim como dos cabos de conexão usados no resistor a ser medido, são eliminados.

De maneira sucinta, a medição consiste em comparar a resistência a ser medida com uma outra resistência cujo valor é determinado pelo ajuste de cinco décadas de resistência reguláveis e de magnitudes distintas, até que o galvanômetro conectado à Ponte de Thomson não indique a presença de corrente (Figura 4.1).

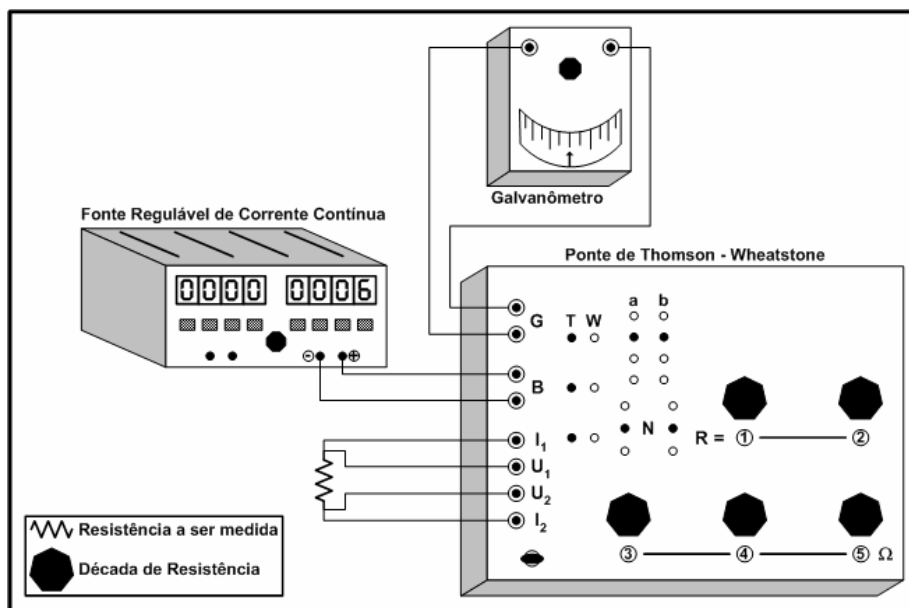


Figura 4.1. Equipamentos usados para determinar o valor ôhmico exato de resistores de carvão.

Os valores ôhmicos verdadeiros dos resistores obtidos com a Ponte de Thomson foram comparados, para fins de comprovação, com os medidos por meio de dois multímetros digitais (modelo GoldStar DM-8433, LG Precision Co., Los Angeles, CA; modelo POL 41, Politerm, São Paulo, SP), tendo ambos precisão de  $\pm 0,8\%$ .

#### 4.1.2. Aquisição e processamento de dados de frequência

A conexão dos circuitos eletrônicos ao computador foi feita via porta paralela. Apesar desta interface de comunicação ter sido desenvolvida para conectar periféricos como impressoras ou *scanners* a computadores, a porta paralela pode ser utilizada para enviar ou receber informações digitais de outros equipamentos (AXELSON, 1996). O conector DB25, responsável por

esta interface, é formado por 25 pinos, dentre os quais 5 pinos podem ser utilizados para receber dados e 12 pinos para enviar dados com base nos níveis lógicos baixo e alto, padrão TTL (*Transistor Transistor Logic*). Como era desejado medir a frequência do sinal nos terminais de saída de cada circuito, foram necessários 2 dos 5 pinos disponíveis para a recepção de dados.

Um programa computacional foi desenvolvido para gerenciar a aquisição de dados de frequência, sendo implementado em linguagem C++, utilizando-se a plataforma de programação C++ *Builder* versão 5. A cada minuto, o programa calculou a razão entre o número de pulsos e o número de segundos, gerando um valor de frequência em hertz para cada circuito. Com a finalidade de se obter dados representativos, foram coletados 30 valores de frequência para cada um dos 29 resistores, calculando-se, posteriormente, a média aritmética de cada conjunto de valores.

As relações entre frequência e resistência foram obtidas por meio de um modelo de regressão com três parâmetros (equação 1). Visando o melhor ajuste do modelo aos dados experimentais medidos, foram geradas duas equações abrangendo as faixas de condutividade elétrica de 0,10 a 2,15 dS m<sup>-1</sup> e de 2,15 a 10,15 dS m<sup>-1</sup>.

$$F = \frac{a (\pm SE_a) + b (\pm SE_b) R}{1 + c (\pm SE_c) R} \quad (\text{equação 1})$$

em que,

F - frequência, Hz;

a, b, c - parâmetros da equação de regressão, adimensionais;

R - resistência, Ω;

SE<sub>i</sub> - desvio padrão associado ao parâmetro i, i = a, b, c.

As equações de regressão geradas para o circuito de condutividade elétrica foram inseridas no programa computacional, possibilitando, por conseguinte, obter valores de resistência calculados a partir dos dados de frequência medidos. Cada valor de resistência foi invertido e multiplicado por um fator igual a 1.000, resultando no valor correspondente de condutividade elétrica em deciSiemens por metro.

#### 4.1.3. Célula de condutividade elétrica

Uma célula de condutividade (modelo EW-19500-20, Cole-Parmer Instrument Company, Chicago, IL) foi utilizada em substituição a um resistor de cada circuito eletrônico. Esta célula possui corpo de vidro (Figura 4.2), dois eletrodos revestidos com negro de platina e cabo blindado com comprimento aproximado de 3 m. A constante da célula (K) é de  $1 \text{ cm}^{-1}$ . No interior do corpo da célula, um sensor do tipo termistor permite medir a temperatura do meio onde a célula está inserida. Este sensor apresenta resistência ôhmica de  $10 \text{ k}\Omega$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e coeficiente de temperatura negativo (NTC), ou seja, sua resistividade elétrica diminui com o aumento de temperatura. Na extremidade do cabo da célula, além do par de fios correspondente aos eletrodos (conectado ao circuito de condutividade elétrica), existe um outro par de condutores referente ao termistor (conectado ao circuito de temperatura). Por meio das medições de temperatura, foi possível compensar a condutividade elétrica da solução em relação à referência ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



Figura 4.2. Célula de condutividade elétrica fabricada pela Cole-Parmer.

#### 4.1.4. Calibração e validação do circuito eletrônico de condutividade elétrica

Estabelecidas as relações entre frequência e condutividade elétrica, bastava calibrar o circuito eletrônico de medição de condutividade. Para este procedimento, foram preparadas 16 soluções padrão de cloreto de potássio (KCl) com as seguintes concentrações: 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005; 0,006; 0,007; 0,008; 0,009; 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07 N.

As soluções padrão foram obtidas a partir do preparo da solução base de KCl com concentração de 0,01 N, a qual possui condutividade elétrica de  $1,4118 \text{ dS m}^{-1}$  à temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (GARTLEY, 1995). Esta solução base, reconhecida internacionalmente como padrão para a calibração de

condutivímetros, foi preparada utilizando-se cloreto de potássio puro para análise (peso molecular de  $74,56 \text{ g mol}^{-1}$ , Merck) seco em estufa (modelo MA-035/1, Marconi, Piracicaba, SP) a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  por aproximadamente 4 horas. Após a secagem, pesou-se  $0,7456 \text{ g}$  deste sal por meio de uma balança analítica de precisão (modelo SA-210, precisão de  $0,0001 \text{ g}$ , Scientech, Bradford, MA), diluindo o mesmo em um volume de  $1000 \text{ ml}$  de água deionizada. Para cada concentração, foi utilizado um volume de  $150 \text{ ml}$  acondicionado em recipiente plástico hermeticamente fechado a fim de evitar a evaporação e conseqüente alteração da concentração.

Para que a calibração do circuito de condutividade fosse conduzida de maneira adequada, foi necessário controlar a temperatura das soluções padrão. Desta forma, empregou-se um equipamento de banho termostatizado com circulação forçada de água (modelo TE-184, faixa de operação de  $-10$  a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , Tecnal, Piracicaba, SP) que possibilita o controle de temperatura da água do banho com precisão de  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Entretanto, em razão do campo eletromagnético, gerado pelo equipamento, provocar alterações significativas nos valores de frequência do circuito quando da medição de condutividade, tornou-se obrigatório o uso de uma caixa de isopor para o acondicionamento térmico das soluções padrão, mantida afastada aproximadamente  $1,5 \text{ m}$  do equipamento. Por meio de mangueiras de borracha, a água com temperatura controlada foi conduzida do equipamento de banho à caixa de isopor e vice-versa, fazendo com que a temperatura da água contida na caixa de isopor fosse mantida conforme desejado. O monitoramento da temperatura da água na caixa de isopor foi realizado por meio de um termômetro padrão de mercúrio em vidro com escala nominal graduada de  $0$  a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este termômetro de referência foi calibrado segundo a norma SP 819 no laboratório da companhia Vaisala em Helsinque na Finlândia. O referido laboratório foi credenciado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), conforme a norma de padronização ISO 25 e EN450001.

O circuito de medição de condutividade foi calibrado considerando-se as temperaturas de  $15$ ,  $25$  e  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , pois as temperaturas normalmente encontradas nos cultivos hidropônicos existentes no Brasil estão entre  $15$  e  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Com base no critério estatístico da repetição, utilizaram-se três células de condutividade elétrica, cujas características foram descritas anteriormente.

Os recipientes plásticos contendo as soluções padrão foram imersos na água do banho, de modo que o nível de água na caixa de isopor permanecesse um pouco acima do nível interno dos recipientes plásticos, garantindo que a temperatura das soluções padrão fosse a mesma da água do banho.

Momentos antes do início de cada medição, após a homogeneização das soluções, a tampa do recipiente no qual a condutividade elétrica seria medida foi substituída por outra com um orifício circular, permitindo introduzir a célula no interior do recipiente e evitando a evaporação da solução. As medições somente foram iniciadas quando a temperatura da água do banho estabilizou no valor desejado. O esquema com todos os equipamentos utilizados na calibração do circuito de condutividade é apresentado na Figura 4.3.

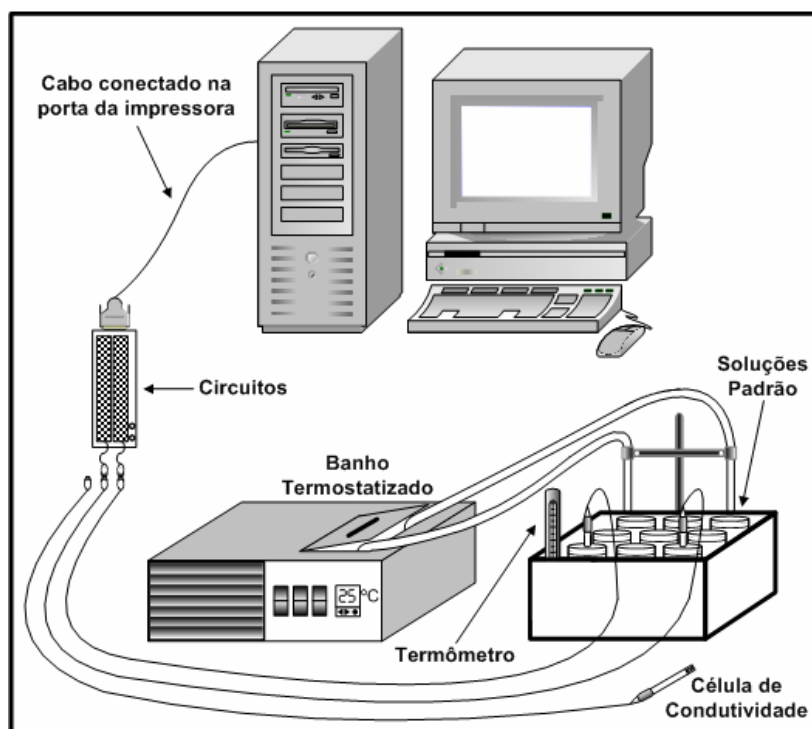


Figura 4.3. Equipamentos utilizados na calibração do circuito de condutividade.

Para cada concentração e valor de temperatura, foram realizadas cinco medidas, sendo que a condutividade elétrica computada para fins de calibração foi a média aritmética dos dados obtidos.

O circuito eletrônico de condutividade elétrica foi validado por comparação das medições de condutividade de soluções eletrolíticas, compreendidas entre  $0,1$  a  $10,0 \text{ dS m}^{-1}$ , com os correspondentes valores ôhmicos verdadeiros de resistores, na faixa de  $10.000$  a  $100 \Omega$ .

#### 4.1.5. Calibração e validação do circuito eletrônico de temperatura

Para medir a temperatura das soluções por meio do termistor de 10 k $\Omega$ , incluso na célula de condutividade e conectado ao respectivo circuito, foi necessário determinar equações de regressão que relacionassem frequência com resistência e resistência com temperatura. A primeira relação foi estabelecida de maneira idêntica à descrita para o circuito de condutividade, entretanto, foram usados 17 resistores de carvão (¼ W) de valores ôhmicos verdadeiros variando de 5.000 a 20.000  $\Omega$ , medidos por meio da Ponte de Thomson, e o modelo de regressão com três parâmetros (equação 1). A razão de não se utilizar a mesma relação entre frequência e resistência em ambos os circuitos se deve à diferença no valor nominal entre um dos componentes eletrônicos.

A relação entre resistência e temperatura foi determinada por meio de calibração, comparando-se as medidas de resistividade elétrica do termistor com as medidas correspondentes de temperatura, na faixa de 10 a 40 °C, obtidas com o termômetro padrão de mercúrio em vidro citado anteriormente. A calibração por comparação é o método mais usual para se ajustar as medidas de sensores de temperatura aos valores reais (STEIDLE NETO, 2003). Nesta calibração, empregou-se um recipiente termicamente isolado contendo água, sendo que, na tampa deste, foram feitos dois orifícios circulares para a inserção da célula de condutividade e do termômetro padrão.

O modelo de regressão utilizado para estabelecer a relação entre resistência e temperatura foi o descrito por DeFELICE (1998) para sensores de temperatura do tipo termistor (equação 2).

$$R = R(T_{ref}) \exp[\beta (\pm SE_{\beta}) (T^{-1} - T_{ref}^{-1})] \quad (\text{equação 2})$$

em que,

R - resistência,  $\Omega$ ;

$R(T_{ref})$  - resistência à temperatura de referência,  $\Omega$ ;

$\beta$  - parâmetro da equação de regressão, K;

$SE_{\beta}$  - desvio padrão associado ao parâmetro  $\beta$ ;

T - temperatura, K;

$T_{ref}$  - temperatura de referência, 298,16 K.

As equações de regressão, obtidas a partir da calibração do circuito eletrônico de temperatura, foram adicionadas ao programa computacional mencionado anteriormente.

Visando a correção da condutividade elétrica de soluções com temperaturas diferentes da temperatura de referência (25 °C), realizou-se uma regressão múltipla, com base na equação linear apresentada por RADIOMETER ANALYTICAL (2007), a qual envolve um coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ) dependente da solução (equação 3).

$$CE = CE(t_{ref}) + 0,01[CE(t_{ref}) \alpha (\pm SE_{\alpha}) (t - t_{ref})] \quad (\text{equação 3})$$

em que,

CE - condutividade elétrica na faixa de 15 a 35 °C, dS m<sup>-1</sup>;

CE(t<sub>ref</sub>) - condutividade elétrica à temperatura de referência, dS m<sup>-1</sup>;

$\alpha$  - coeficiente de temperatura, % °C<sup>-1</sup>;

SE <sub>$\alpha$</sub>  - desvio padrão associado ao coeficiente  $\alpha$ ;

t - temperatura, °C;

t<sub>ref</sub> - temperatura de referência, 25 °C.

Após a regressão, a equação de correção da condutividade elétrica para a temperatura de 25 °C também foi incluída no programa computacional de aquisição de dados de frequência.

Após ser calibrado, o circuito eletrônico de temperatura foi validado comparando-se os valores de temperatura, obtidos por meio do termistor, com as medidas de um termômetro padrão de mercúrio em vidro (escala nominal de 0 a 50 °C). Além do termistor de 10 k $\Omega$ , conectado ao circuito eletrônico a ser validado, também foram utilizados um sensor com o formato de circuito integrado (modelo DS1820, faixa de medição de -55 a 125 °C, exatidão de  $\pm 0,5$  °C, Dallas Semiconductor, Dallas, TX) e um sensor de platina do tipo RTD (modelo Humitter 50Y, faixa de medição de -10 a 60 °C, exatidão de  $\pm 0,7$  °C, Vaisala Inc., Woburn, MA), conforme mostrado na Figura 4.4. Os sensores DS1820 e Humitter 50Y, disponíveis comercialmente a custos bastante superiores ao do termistor, foram conectados a sistemas seriais de aquisição de dados (RS-232). O circuito eletrônico foi validado considerando-se a mesma faixa de temperatura empregada na calibração, ou seja, de 10 a 40 °C.

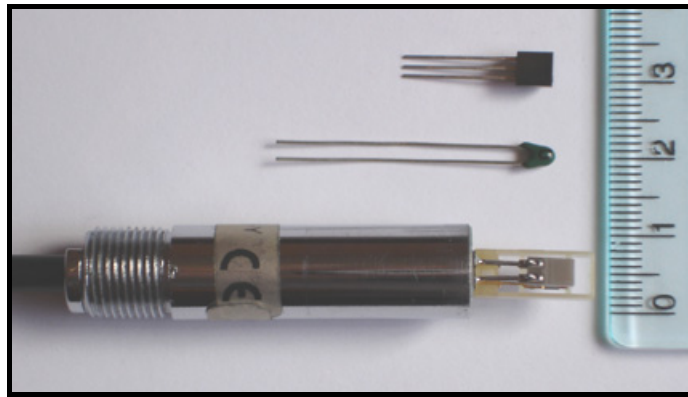


Figura 4.4. Sensor de temperatura Humitter 50Y (inferior), DS1820 (superior) e termistor (meio) contido no interior da célula de condutividade elétrica, usados no processo de validação do circuito eletrônico de temperatura.

Para avaliar quantitativamente os desvios dos sensores de temperatura em relação ao termômetro padrão, utilizou-se o índice de concordância de Willmott (WILLMOTT et al., 1985) e o erro absoluto médio, descritos pelas equações 4 e 5, respectivamente.

$$CW = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y - x)^2}{\sum_{i=1}^n (|y - x| + |x - \bar{x}|)^2} \right] \quad (\text{equação 4})$$

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |y - x|}{n} \quad (\text{equação 5})$$

em que,

- CW - índice de concordância de Willmott, adimensional;
- EAM - erro absoluto médio, °C;
- x - temperatura medida por meio do termômetro padrão, °C;
- $\bar{x}$  - média aritmética das temperaturas obtidas por meio do termômetro padrão, °C;
- y - temperatura medida por meio do termistor, sensor DS1820 e RTD, °C;
- n - número de dados de temperatura de cada sensor.

Para atender critérios estatísticos, a validação foi repetida três vezes empregando-se, em cada repetição, conjuntos diferentes de sensores. A partir

dos dados obtidos, foram gerados gráficos relacionando o termistor, o sensor DS1820 e o RTD (variáveis dependentes) ao termômetro padrão (variável independente).

## **4.2. Desenvolvimento e implementação de um sistema computadorizado de controle aplicado ao cultivo do tomateiro em casa de vegetação**

### **4.2.1. Produção de mudas, cultivo e manejo do tomateiro em casa de vegetação**

A produção de mudas e o cultivo de plantas de tomate foram conduzidos em uma casa de vegetação localizada na área experimental do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO), no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa - MG, com as coordenadas geográficas: latitude 20° 45' S, longitude 42° 52' O e altitude 690 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa (clima temperado quente - mesotérmico; chuvoso no verão e seco no inverno).

A estrutura metálica de cobertura da casa de vegetação era do tipo arco, sobre a qual foram fixadas duas camadas de filme de polietileno de baixa densidade (PEBD) com espessura de 150 µm. As paredes laterais eram formadas por painéis de policarbonato transparente com 1 cm de espessura, parafusados em peças metálicas de aço galvanizado. O piso da casa de vegetação era de concreto revestido por argamassa, o que contribuía para a melhor assepsia e erradicação de plantas invasoras no interior do ambiente. A instalação, orientada no sentido Nordeste-Sudoeste, apresentava características modulares e pré-fabricadas (Van der Hoeven, Artur Nogueira, SP), com 18,3 m de comprimento e 6,5 m de largura, totalizando uma área de 119 m<sup>2</sup>, com pé-direito lateral de 2,9 m (Figura 4.5). Entretanto, a área efetiva ocupada pelas plantas de tomate foi de 50 m<sup>2</sup>, aproximadamente.



Figura 4.5. Casa de vegetação onde foi conduzido o experimento, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa.

A casa de vegetação era equipada com sistemas de climatização para o aquecimento e resfriamento do ar. O sistema de resfriamento era constituído por um painel de celulose (6,3 x 0,9 x 0,2 m), por dois exaustores com capacidade individual para a remoção de  $300 \text{ m}^3_{\text{ar}} \text{ min}^{-1}$  ( $\Phi = 0,9 \text{ m}$ , potência do motor de 735,5 W), posicionados na parede oposta à do painel de celulose, e por um conjunto moto-bomba responsável pelo recalque de água para a parte superior do painel de resfriamento evaporativo. O controle de acionamento do sistema de resfriamento era baseado na temperatura do ar interno por meio do ajuste manual de um termostato localizado na parte central da instalação. Neste experimento, considerando-se a faixa de temperatura adequada ao crescimento e desenvolvimento do tomateiro, o sistema de resfriamento foi ajustado para acionar quando a temperatura do ar interno fosse superior a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O sistema de aquecimento do ar interno era formado por dois pares de ventiladores ( $\Phi = 0,4 \text{ m}$ , potência do motor de 242,7 W) associados a resistências elétricas, distribuídos a cada terço da instalação e fixados a uma altura de 2,1 m em relação ao nível do piso. Em função das baixas temperaturas do ar interno durante o inverno, o sistema de aquecimento foi programado, por meio de um temporizador (Cronomat, Sermar, São Paulo, SP), para ser acionado no período das 19:00 às 06:00 horas, sendo desligado por intervalos de 30 minutos após cada período de funcionamento do sistema de 2 horas. Apesar de não controlar adequadamente a temperatura mínima do

ar, o sistema de aquecimento minimizou, de maneira satisfatória, o decréscimo excessivo da temperatura do ar interno em relação ao externo.

A produção das mudas de tomate foi realizada sobre uma telha ondulada de cimento-amianto revestida na parte superior por três materiais distintos (filme de polietileno transparente com espessura de 150 µm, manta de feltro e tecido sintético de poliamida). Esta telha foi posicionada sobre blocos de concreto situados encima de uma bancada (estrado de madeira), com inclinação de 6%, permitindo assim o escoamento da solução nutritiva por gravidade (Figura 4.6).

O conjunto hidráulico responsável pela aplicação, coleta e armazenamento da solução nutritiva, foi montado empregando-se uma bomba de fertirrigação (eletrobomba de drenagem, P. Monti, São Paulo, SP), mangueira de ¾" de borracha, tubos e conexões de PVC (Figura 4.6). Um temporizador conjugado a relé eletromecânico (Flash, São Paulo, SP) controlava o acionamento da bomba de fertirrigação em intervalos de tempo intermitentes.



Figura 4.6. Conjunto montado para a produção das mudas de tomate.

Sementes de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), cultivar Duradoro, foram semeadas individualmente em células de espuma à base de resina fenólica com dimensões de 5,0 x 5,0 x 3,8 cm (Green-up, Atlanta, Diadema, SP), em número superior ao necessário a fim de permitir a seleção das mudas

mais sadias, vigorosas e bem formadas para o transplante. Após a semeadura, as espumas foram posicionadas ao longo do maior comprimento da telha, conforme mostrado na Figura 4.6.

A cultivar Duradoro é um híbrido F1, desenvolvida pela Embrapa Hortaliças, resultante do cruzamento de uma linhagem com resistência múltipla a doenças com uma linhagem contendo o gene *rin*, que confere a característica de longa vida (EMBRAPA HORTALIÇAS, 2006). Essa cultivar é resistente ao vírus vira-cabeça, à mancha-de-estenfílio, à murcha-de-fusário e à murcha-de-verticílio.

A partir da semeadura (31/05/2006) até a germinação das sementes, a irrigação foi realizada apenas com água ( $CE = 0,07 \text{ dS m}^{-1}$ ), durante períodos de tempo de 10 minutos com intervalos de 50 minutos, nos horários compreendidos entre as 6:00 e 18:00 horas. Após a germinação, as mudas de tomate passaram a ser fertirrigadas com solução nutritiva, preparada manualmente a partir das soluções-estoque A e B (50 vezes concentradas). Estas soluções-estoque foram formuladas para a fase A do tomateiro (Tabela 4.1), compreendida desde a semeadura até 30 dias após o transplante, conforme recomendado por MORAES e FURLANI (1999).

Tabela 4.1. Formulação geral das soluções-estoque A e B (50 vezes concentradas) para as fases A, B e C da cultura do tomateiro (g/100 L).

Fertilizante	Fase		
	A (até 30 DAT <sup>1</sup> )	B (30 a 60 DAT)	C (após 60 DAT)
Nitrato de Potássio <sup>2</sup>	750	200	200
Nitrato de Cálcio <sup>2</sup>	4000	5000	5500
Fosfato Monoamônio Purificado <sup>3</sup>	1250	1250	1250
Sulfato de Magnésio <sup>3</sup>	2000	2000	2000
Cloreto de Potássio <sup>3</sup>	2500	3000	3800
Sulfato de Cobre <sup>4</sup>	1	1	1
Sulfato de Zinco <sup>4</sup>	2,5	2,5	2,5
Sulfato de Manganês <sup>4</sup>	15	15	15
Ácido Bórico <sup>4</sup>	15	15	15
Molibdato de Sódio <sup>4</sup>	0,75	0,75	0,75
Tenno Ferro <sup>4</sup> (6%)	200	200	200

<sup>1</sup> Dias Após o Transplante (DAT);

<sup>2</sup> Macronutrientes que compõem a solução-estoque A;

<sup>3</sup> Macronutrientes que compõem a solução-estoque B;

<sup>4</sup> Micronutrientes que compõem a solução-estoque B;

Fonte: MORAES e FURLANI (1999).

A condutividade elétrica da solução nutritiva de fertirrigação foi ajustada diariamente, sendo mantida em  $0,8 \text{ dS m}^{-1}$ . A frequência e a duração dos eventos de fertirrigação foram as mesmas de quando foi aplicada apenas água.

Após o transplante, as mudas de tomate foram cultivadas em substrato de areia (granulometria entre 1 e 3 mm) acondicionado em vasos plásticos com capacidade individual para 15 L.

A escolha da areia foi em razão do baixo custo, da disponibilidade na região e das suas características físicas favoráveis à aeração das raízes e a drenagem. Adicionalmente, a areia é quimicamente inerte, permitindo o controle mais preciso da nutrição mineral das plantas (ANDRIOLO, 1999).

No fundo de cada vaso de cultivo foi feito um orifício circular (dreno) para permitir a coleta da solução nutritiva percolada. Acima do dreno, foi colocado um disco de tela plástica para impedir a remoção da areia, 0,5 L de cascalho fino e 9,5 L de areia (Figura 4.7).



Figura 4.7. Disposição do dreno, disco de tela plástica, cascalho fino e areia no interior do vaso de cultivo.

O transplante das mudas para os vasos foi realizado 40 dias após a semeadura, inserindo cada célula de espuma em um orifício feito a partir da superfície da areia, no centro de cada vaso. Com o propósito de reduzir o estresse ocasionado em função dos inevitáveis danos às raízes das mudas devido à transferência para os vasos de cultivo, o transplante foi realizado no final da tarde do dia 10/07/2006 para que, durante o período noturno, fosse restabelecida a absorção de água e nutrientes.

O sistema de fertirrigação, para aplicação da solução nutritiva diretamente no substrato junto às raízes das plantas, foi do tipo localizado, empregando-se estacas gotejadoras para vasos (Amanco, São Paulo, SP) conectadas a microtubos flexíveis que derivavam de tubulações de PVC.

Como era desejado que a incorporação de vapor d'água ao ambiente, a partir da solução nutritiva aplicada no sistema planta-substrato, fosse por meio da transpiração das plantas, a área em torno do caule foi coberta com um filme plástico transparente (*mulching*) a fim de minimizar as perdas por evaporação (Figura 4.8).



Figura 4.8. Vaso de cultivo com estaca gotejadora e filme plástico transparente para minimizar a evaporação da solução nutritiva.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, constituído de dois tratamentos (sistema automático e sistema convencional), descritos posteriormente. Cada tratamento foi formado por 32 plantas dispostas em 4 pares de fileiras (repetições), totalizando 8 plantas por repetição. As fileiras foram compostas individualmente por um conjunto de 4 vasos apoiados em blocos de concreto e espaçados, centro a centro, de 0,5 m.

Um perfil hidropônico de polipropileno (Hidrogood, Taboão da Serra, SP), com 2,6 m de comprimento, foi utilizado como calha para a coleta da solução nutritiva drenada em cada fileira, sendo instalado com inclinação de 4% na direção do corredor central. As extremidades de cada perfil foram fechadas utilizando-se peças de borracha flexível específicas para esta finalidade, permitindo a coleta da solução drenada em um balde de 15 L. Os

pares de fileiras referentes ao sistema automático foram intercalados com os do sistema convencional (Figura 4.9).



Figura 4.9. Vista parcial da área de cultivo do tomateiro, mostrando a disposição das plantas em pares de fileiras (constituídas, separadamente, por quatro plantas) e o sistema de coleta de solução drenada.

Com a finalidade de diminuir o número de ramos por planta, foi realizada a eliminação dos brotos laterais provenientes das axilas de cada folha, em intervalos regulares de uma semana, conforme recomendado por ALVARENGA (2004).

O tutoramento foi o recurso empregado para proporcionar a sustentação física das plantas e para evitar o tombamento do tomateiro causado pelo próprio peso, principalmente, quando do acréscimo de peso ocasionado pelos frutos. Fios de arame (número 16) foram fixados nas peças metálicas laterais de sustentação dos painéis de policarbonato, ao longo da seção transversal da casa de vegetação. Nestes fios foram amarrados fitilhos plásticos que, individualmente, foram enrolados ao longo da haste principal do tomateiro até a base do caule, sendo fixados nos vasos.

Como a cultivar de tomate escolhida possui crescimento indeterminado (EMBRAPA HORTALIÇAS, 2006), foi estabelecido que o crescimento vertical da planta em uma haste seria interrompido por meio de despona, três folhas acima do quinto cacho floral.

O raleio dos frutos, com o objetivo de aumentar o tamanho e a qualidade dos tomates, foi realizado preservando-se seis frutos por cacho. Os frutos de tamanho muito reduzido em relação aos demais de um mesmo cacho e os que apresentavam algum tipo de anomalia fisiológica foram os escolhidos para serem eliminados, seguindo a orientação de ALVARENGA (2004). Assim sendo, o número total de tomates produzidos por planta foi de 30 frutos, totalizando 1.920 unidades em todo o experimento.

Ao término dos 30 dias após o transplante, as soluções-estoque A e B (50 vezes concentradas) foram substituídas pelas soluções formuladas para a fase B do tomateiro, compreendida dos 30 aos 60 dias após o transplante. Posteriormente, ao serem atingidos os 60 dias após o transplante, foi realizada a segunda e última substituição das soluções-estoque A e B para a fase C do tomateiro (Tabela 4.1).

A solução-estoque A (50 vezes concentrada) foi preparada a partir das quantidades (g/100 L) de nitrato de potássio e nitrato de cálcio especificadas na Tabela 4.1, de acordo com as fases A, B e C do tomateiro. Similarmente, o preparo da solução-estoque B (50 vezes concentrada) foi realizado utilizando-se as quantidades dos demais fertilizantes da Tabela 4.1, conforme a fase.

Quando do preparo da solução nutritiva a ser aplicada para as plantas, independentemente do estágio de desenvolvimento da cultura, as soluções-estoque concentradas A e B sempre foram misturadas à água em proporções iguais, ou seja, em volumes idênticos. As condutividades elétricas resultantes da mistura da solução-estoque A com a B para as fases A, B e C do tomateiro foram iguais a 61,8; 74,6 e 87,7 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente.

#### **4.2.2. Sistema de aquisição de dados micrometeorológicos**

As variáveis micrometeorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar, radiação global e radiação fotossinteticamente ativa) foram medidas internamente à casa de vegetação. Adicionalmente, medidas de temperatura e umidade relativa do ar externo também foram realizadas de maneira ininterrupta durante todo o ciclo da cultura.

Além do sensor de velocidade do ar (anemômetro de fio quente, modelo FMA-903-I, Omega, Stamford, CT), os sensores conjugados de temperatura e umidade relativa do ar interno e externo (modelo Humitter 50Y, Vaisala Inc.,

Woburn, MA) foram conectados a uma placa de aquisição de dados (modelo CYDAS 1602HR, CyberResearch, Branford, CT), instalada no barramento ISA de um computador (processador IBM 686, 133 MHz, 32 MB de RAM, sistema operacional: Microsoft Windows 98).

Devido à magnitude dos sinais, os sensores de radiação solar global (piranômetro, modelo CM3, Kipp e Zonen, Delft, Holanda) e de radiação fotossinteticamente ativa (sensor quântico, modelo LI-190SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE) foram conectados a uma placa de expansão (modelo CYEXP 32, CyberResearch, Branford, CT), instalada junto à placa CYDAS 1602HR, com a finalidade de amplificar os sinais destes sensores antes da conversão analógica-digital.

Para evitar a presença de ruídos eletromagnéticos nos sinais analógicos e digitais, foi inserida no solo, externamente à casa de vegetação, uma haste de aterramento em cobre. Por meio de um condutor elétrico, essa haste foi conectada fisicamente à tomada da rede de alimentação dos sistemas automático e convencional.

Os sensores para o monitoramento das variáveis micrometeorológicas internas foram posicionados em um pedestal de altura regulável que foi ajustado ao longo de todo o ciclo do tomateiro, mantidos a 0,5 m acima do dossel vegetativo da cultura (Figura 4.10). As informações obtidas por meio destes sensores tornaram possíveis a caracterização microclimática do ambiente de cultivo e as estimativas da transpiração do tomateiro.



Figura 4.10. Pedestal com os sensores de monitoramento das variáveis micrometeorológicas internas à casa de vegetação.

O sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar, posicionado externamente, foi instalado dentro de um micro abrigo de multiplacas, 0,5 m acima do pé-direito lateral da casa de vegetação (3,4 m de altura em relação ao nível do solo), a fim de impedir a incidência direta da radiação solar e da precipitação sobre os elementos sensíveis do sensor e, ao mesmo tempo, garantir um adequado fluxo de ar (Figura 4.11).



Figura 4.11. Micro abrigo de multiplacas dentro do qual foi instalado o sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar externo.

Um programa computacional foi especialmente desenvolvido para gerenciar o controle do preparo e da aplicação de soluções nutritivas (Apêndice). A implementação deste programa foi feita em linguagem C++, utilizando-se a plataforma de programação C++ *Builder* versão 5. A este programa computacional nomeou-se de **HidroControle**. Uma das funções do HidroControle foi o gerenciamento da placa de aquisição de dados responsável por converter os sinais analógicos dos sensores em sinais digitais no formato binário (LYNX, 2007). Após este procedimento, o programa realizou a conversão dos valores binários, associados a cada variável micrometeorológica medida, em valores decimais.

Os dados micrometeorológicos foram armazenados no disco rígido do computador por meio do HidroControle em intervalos de tempo de 1 minuto. Cada valor correspondeu à média de 5 medições realizadas com intervalos de 1 segundo, totalizando, para cada variável, 1.440 valores por dia.

Apesar do monitoramento da radiação fotossinteticamente ativa, da velocidade do ar interno e da umidade relativa do ar externo, ao longo de todo o ciclo da cultura, estas variáveis micrometeorológicas não foram utilizadas nas estratégias de controle dos sistemas automático e convencional (descritas posteriormente).

#### **4.2.3. Sistema automático (computadorizado) para preparo e aplicação de soluções nutritivas**

O sistema automático foi constituído por um conjunto hidráulico associado a sensores, bombas de injeção, dispositivos e circuitos eletrônicos controlados pelo mesmo computador responsável pela aquisição de dados micrometeorológicos, sendo gerenciados pelo HidroControle.

Basicamente, o conjunto hidráulico era formado por reservatórios plásticos, utilizados no armazenamento de solução nutritiva (tanque de preparo), água e soluções-estoque concentradas A e B. Com exceção do tanque de preparo (tubo de PVC,  $\Phi = 25,4$  cm,  $h = 75$  cm), os demais reservatórios possuíam capacidade individual para, aproximadamente, 100 L. Na parte lateral inferior dos reservatórios de água e de soluções-estoque A e B, foram conectadas, por meio de mangueiras de polietileno ( $\Phi = 4$  mm), bombas de injeção (eletrobombas de partida a frio, Élice, Salto, SP) para a dosagem precisa dos volumes a serem adicionados no tanque de preparo (Figura 4.12). Já no reservatório de armazenamento de solução nutritiva, foi instalada, na parte lateral inferior, uma bomba de fertirrigação (eletrobomba de drenagem, P. Monti, São Paulo, SP) responsável pelo recalque da solução preparada (Figura 4.12) até a extremidade final dos microtubos onde estavam encaixadas as 32 estacas gotejadoras do sistema automático.

O reservatório de armazenamento de água foi conectado, por meio de mangueira de  $\frac{3}{4}$ ", a um registro hidráulico que permitiu a regulação do fornecimento de água proveniente da estação de tratamento da UFV. Uma bóia plástica, instalada no interior deste tanque, manteve o nível de água sempre constante.

Foi utilizado um compressor de ar, fabricado para aquários residenciais, cuja função era incorporar ar na solução contida no tanque de preparo e, assim, promover a permanente homogeneização da solução nutritiva.

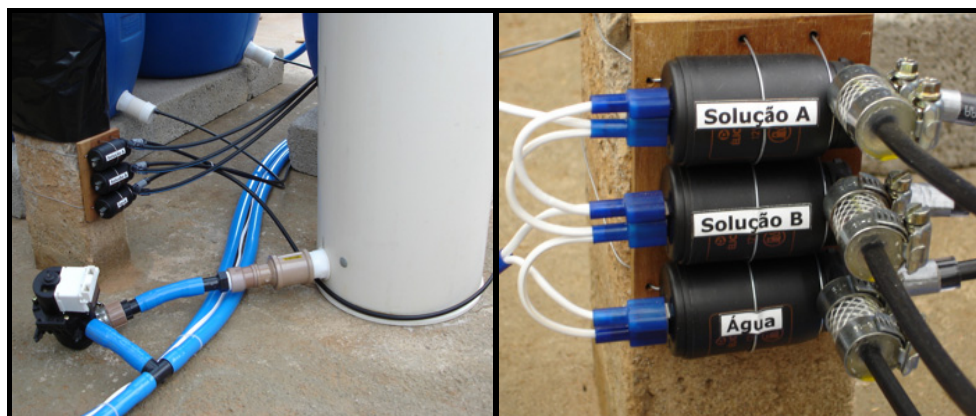


Figura 4.12. Bomba de fertirrigação (inferior esquerda) conectada ao tanque de preparo de solução nutritiva e, bombas de injeção de água e de soluções-estoque concentradas A e B (direita).

Na Figura 4.13 é apresentado o conjunto completo do sistema automático para o preparo e aplicação de soluções nutritivas.



Figura 4.13. Sistema automático para o preparo e aplicação de soluções nutritivas destinadas ao cultivo do tomateiro.

O monitoramento em tempo real da concentração da solução nutritiva drenada nos vasos do sistema automático foi realizado por meio de circuitos eletrônicos de condutividade elétrica e temperatura (Figura 4.14), descritos no item 4.1. As equações de regressão associadas a estes circuitos foram incorporadas ao HidroControle, sendo geradas, conforme descrito anteriormente, a partir das equações 1, 2 e 3.

Uma placa de acionamento digital a relés (modelo ERA-01, Keithley Instruments Inc., Cleveland, OH), constituída por oito relés eletromecânicos associados a indicadores visuais (*LEDs*), dos quais foram utilizados apenas três, foi utilizada para controlar as bombas de injeção de água, soluções-estoque concentradas e solução nutritiva preparada. Esta placa de relés (Figura 4.14) foi conectada fisicamente ao terminal de entradas/saídas digitais da placa CYDAS 1602HR e gerenciada pelo HidroControle.

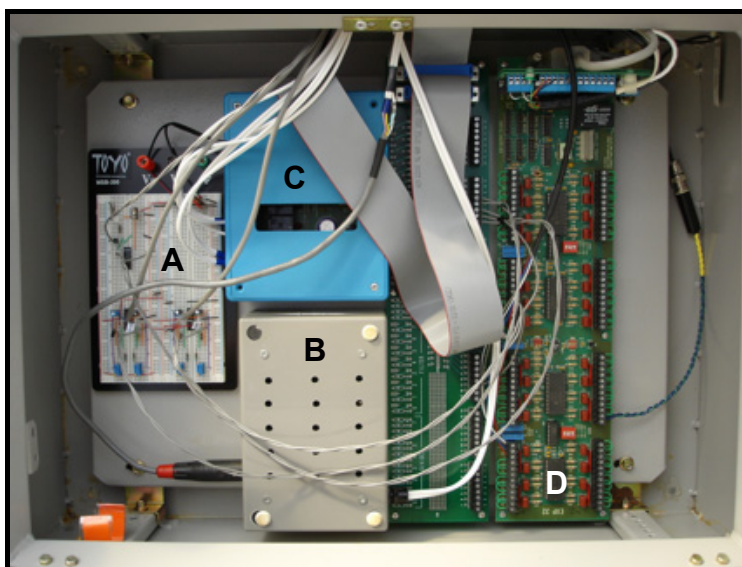


Figura 4.14. Caixa metálica de proteção contendo os circuitos eletrônicos de condutividade elétrica, temperatura e detecção de nível (A); fonte de alimentação das bombas de injeção (B); placa de relés ERA-01 (C); placa de expansão CYEXP 32 (D).

Os terminais de uma célula de condutividade elétrica (modelo EW-19500-20, Cole-Parmer Instrument Company, Chicago, IL) foram conectados aos circuitos eletrônicos mencionados, sendo a mesma inserida no interior de um conjunto formado por uma peça de borracha flexível, comercialmente conhecida como tampão, e por conexões de PVC. Este conjunto foi encaixado em uma das extremidades de um dos perfis hidropônicos utilizados como calha para a coleta da solução drenada nos vasos associados ao sistema automático (Figura 4.15). Parte do excesso de solução percolada foi retida neste conjunto, mantendo os eletrodos da célula constantemente imersos. Após cada evento de fertirrigação, respeitando-se o intervalo de tempo necessário à drenagem, a solução retida era renovada, fazendo com que o monitoramento da condutividade elétrica acompanhasse em tempo real a variação da

concentração total de sais dissolvidos na solução, ao longo de todo o ciclo do tomateiro.



Figura 4.15. Conjunto para medição de condutividade elétrica e balde de coleta da solução nutritiva drenada.

O sensor de detecção do nível de solução nutritiva contida no tanque de preparo foi construído utilizando-se duas hastes cilíndricas em aço inox (eletrodos), conexões de ½” de PVC e 3 m de cabo coaxial blindado (Figura 4.16). Este sensor foi instalado no interior do reservatório de preparo de solução nutritiva a 0,53 m de altura em relação ao fundo e a 0,1 m da parede interna do tanque. Os terminais deste sensor foram conectados a um circuito eletrônico específico (Figura 4.17) permitindo, quando do preparo da solução, desligar a bomba de injeção de água ao ser atingida a altura preestabelecida no tanque de preparo e, desta maneira, evitando o transbordamento da solução caso ocorresse alguma falha no sistema de controle.

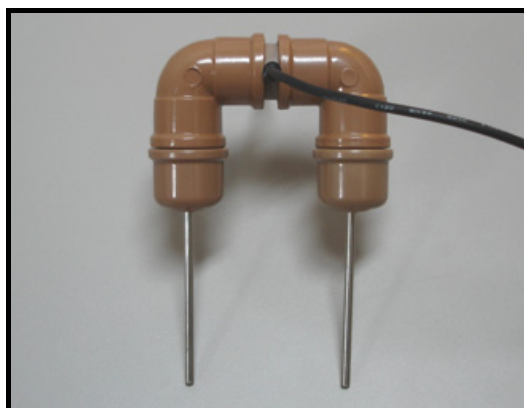


Figura 4.16. Sensor de detecção do nível de solução nutritiva.

Os sinais elétricos dos circuitos de condutividade, temperatura e detecção do nível de solução nutritiva foram aplicados no conector de entradas/saídas digitais da placa CYDAS 1602HR.

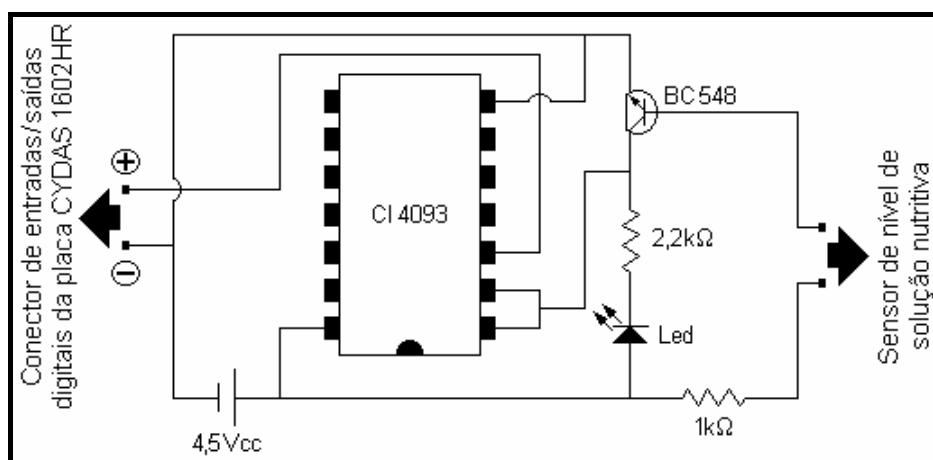


Figura 4.17. Diagrama eletrônico do circuito de detecção do nível de solução nutritiva.

Estando energizado o circuito eletrônico da Figura 4.17, o nível lógico baixo, representado por uma tensão próxima de zero, será reconhecido pelo computador, por meio do programa computacional, quando ambos os eletrodos do sensor não estiverem em contato físico direto com a solução. Ao contrário, quando o nível de solução nutritiva no tanque de preparo alcançar os eletrodos do sensor, ocorrerá passagem de corrente entre eles, fazendo com que a tensão aplicada no conector da placa CYDAS 1602HR seja de, aproximadamente, 4,5 Vcc (nível lógico alto).

Em razão do grande número de ajustes realizados na solução nutritiva contida no tanque de preparo, visando corrigir a condutividade elétrica da solução drenada para o valor desejado, optou-se pelo cultivo hidropônico sem recirculação de efluentes. Ou seja, a solução drenada nos vasos não foi reutilizada, pois ajustes na solução nutritiva em cultivo hidropônico fechado podem resultar em toxidez ou carência de macro e micronutrientes. Adicionalmente, caso ocorresse a contaminação por patógenos no substrato de um ou mais vasos de cultivo, a reutilização da solução provocaria a disseminação destes patógenos para as demais plantas, podendo causar problemas sérios. Entretanto, para minimizar o excesso de efluente e, conseqüentemente, a contaminação ambiental causada pelo descarte da

solução drenada, o sistema automático controlou o tempo de acionamento da bomba de fertirrigação de maneira a suprir o déficit hídrico das plantas, permitindo que a drenagem fosse de, no máximo, 20% do volume de solução nutritiva aplicada. Este percentual está em concordância com a faixa de fração lixiviada (10 a 20%) mencionada por HOCHMUTH (2001b). O excesso de 20% de solução nutritiva era necessário para manter o balanço adequado de nutrientes no substrato (AYERS e WESTCOT, 1985) e para garantir um apropriado monitoramento da condutividade elétrica da solução drenada.

Devido à interferência mútua dos sinais dos eletrodos de pH e CE, quando imersos em uma mesma solução, o potencial hidrogeniônico da solução nutritiva não foi monitorado e controlado pelo sistema automático. Entretanto, foram realizadas regularmente, a cada intervalo de uma semana, medidas de pH em amostras de água e solução nutritiva aplicadas às plantas por meio de um eletrodo de pH (modelo PHE-1304-NB, Omega, Stamford, CT), a fim de proceder a correção caso o pH não estivesse dentro da faixa de 5,5 a 6,5 recomendada para a maioria dos cultivos hidropônicos.

#### **4.2.4. Estratégia de controle do sistema automático**

A estratégia de controle do sistema automático, implementada no HidroControle, teve por objetivos ajustar, em tempo real e ao longo do ciclo da cultura, a condutividade elétrica e a frequência das fertirrigações.

A concentração das soluções nutritivas, controlada por meio da condutividade elétrica, tem sido aumentada nos últimos anos, especialmente na produção com alta qualidade de hortaliças de frutos como o tomate. Dependendo da variedade do tomateiro, alguns especialistas recomendam soluções nutritivas com condutividades entre 3,0 e 4,5 dS m<sup>-1</sup> (SCHWARZ e KUCHENBUCH, 1997). O motivo para este aumento é a melhoria na qualidade do tomateiro, resultando em frutos mais saborosos devido ao acréscimo no teor de sólidos solúveis totais. Com base nesta recomendação e nos bons resultados obtidos por ISMAIL e AHMAD (1997) no que se refere ao crescimento, desenvolvimento e produtividade do tomateiro (cv. *Sweet Chelsea*), cultivado em substrato de areia com solução nutritiva (3 dS m<sup>-1</sup>) e sob condições de casa de vegetação em região tropical (Malásia), a concentração da solução nutritiva, contida no reservatório de preparo do

sistema automático, era aumentada quando a condutividade elétrica da solução drenada era inferior a  $3 \text{ dS m}^{-1}$  e reduzida nos momentos que a condutividade elétrica da solução drenada era superior a  $3 \text{ dS m}^{-1}$ .

Segundo KATSOULAS et al. (2006), a condutividade elétrica da solução nutritiva no ambiente radicular deve variar entre um valor baixo, o qual implica na disponibilidade de nutrientes para as plantas, e um valor alto, que deve ser determinado com base na capacidade das plantas para se desenvolverem com elevada concentração. Assim sendo, os decréscimos e acréscimos na condutividade elétrica da solução nutritiva a ser aplicada para as plantas foram limitados pelo valor mínimo de  $1,5 \text{ dS m}^{-1}$  e máximo de  $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente, preestabelecidos na estratégia de controle.

A frequência de aplicação da solução nutritiva para as plantas era controlada pelas estimativas de transpiração do tomateiro. Nestas estimativas foram considerados os estádios de desenvolvimento do tomateiro, representados pelos coeficientes da cultura ( $K_c$ ), e as variáveis micrometeorológicas internas (radiação solar global, temperatura do ar e umidade relativa do ar) e externa (umidade relativa do ar) à casa de vegetação.

De acordo com INIESTA (1999), uma boa prática de manejo em cultivos que empregam substratos é manter constante o volume de solução nutritiva aplicado por evento e variar a frequência de fertirrigações conforme a necessidade das plantas. Assim sendo, a duração dos eventos de fertirrigação do sistema automático foi preestabelecida com um intervalo de tempo fixo calculado para repor o déficit hídrico das plantas com base na capacidade de retenção de água da areia.

#### **4.2.4.1. Capacidade de retenção de água e densidade aparente da areia**

A determinação da capacidade de retenção de água e da densidade aparente do substrato utilizado no cultivo do tomateiro foi realizada no Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Um tubo de PVC com diâmetro de 25,4 cm e comprimento de 75 cm foi fechado em uma de suas extremidades, sendo graduado ao longo do comprimento a cada 5 cm e posicionado no sentido vertical acima de uma bancada. Na parte lateral

inferior do tubo, junto à extremidade fechada, foi feito um dreno com diâmetro de ½” a fim de permitir o fluxo de água.

O tubo de PVC foi preenchido com areia de mesma granulometria posteriormente utilizada no cultivo do tomateiro, evitando-se a compactação. A areia contida no tubo foi saturada com água de baixo para cima por meio do dreno até a formação de uma lâmina d’água sobre a superfície da areia. A condição de saturação foi mantida por um período de 24 horas. Após o término do período de saturação, permitiu-se a drenagem livre de água da coluna de areia através do dreno por um tempo igual ao de saturação, sendo a extremidade superior do tubo tampada para impedir a evaporação.

De acordo com GRAS (1987), ao término do período de drenagem livre, a coluna de areia atinge a capacidade máxima de retenção de água. Esse conceito representa uma umidade média, pois o teor de água é mais elevado na base da coluna de areia e diminui com o aumento da altura em direção à extremidade superior (ANDRIOLO, 1999).

Posteriormente à drenagem, retirou-se uma amostra de cada ponto graduado ao longo da altura do tubo, totalizando 14 amostras representativas de tensões matriciais variando de 0,5 a 7,0 kPa. As amostras foram acondicionadas individualmente em recipientes de alumínio, pesadas para a determinação das massas de areia úmida e, secas em estufa (modelo 3, Icamo, Cordovil, RJ) por 24 horas a 100 °C. Ao final da secagem, as amostras foram pesadas e, considerando-se a tara individual de cada recipiente, determinaram-se os percentuais em massa de água retida em cada altura da coluna de areia.

A densidade aparente média da areia foi calculada, a partir de três amostras, pela razão entre uma determinada massa de areia seca em estufa e o volume correspondente a esta massa.

#### **4.2.4.2. Estratégia de controle da concentração de soluções nutritivas**

A condutividade elétrica média diária ( $\overline{CE}$ ), variável integrante do procedimento de tomada de decisão relacionado à concentração de preparo da solução nutritiva, era calculada por meio da equação 6.

$$\overline{CE} = \frac{\sum_{i=1}^n CE}{n} \quad (\text{equação 6})$$

em que,

$\overline{CE}$  - condutividade elétrica média diária do sistema automático, dS m<sup>-1</sup>;

CE - condutividade elétrica instantânea do sistema automático, dS m<sup>-1</sup>;

n - número de minutos correspondente a 1 dia, 1.440 min.

A variável da estratégia de controle  $CE_{\text{corr}}$ , definida como a condutividade elétrica corrigida a ser preparada pelo sistema automático para a fertirrigação, foi implementada no HidroControle visando diminuir as diferenças entre a condutividade elétrica desejada e a medida no final da calha de coleta de solução nutritiva drenada. Esta variável era atualizada a cada intervalo de 1.440 minutos (1 dia).

$$CE_{\text{corr } j} = CE_{\text{corr } j-1} + \xi_{\text{controle}} \quad (\text{equação 7})$$

em que,

$CE_{\text{corr}}$  - condutividade elétrica corrigida, dS m<sup>-1</sup>;

$\xi_{\text{controle}}$  - erro da variável de controle, adimensional;

j - índice que representa o dia juliano, adimensional.

O erro da variável de controle ( $\xi_{\text{controle}}$ ) foi calculado diariamente considerando a condutividade elétrica média diária ( $\overline{CE}$ ) e a condutividade elétrica desejada ( $CE_{\text{desejada}}$ ) de valor fixo igual a 3 dS m<sup>-1</sup>, conforme as seguintes condições:

Se  $\overline{CE} > CE_{\text{desejada}} + 0,1 \rightarrow$  então:  $\xi_{\text{controle}} = -0,03$

Senão se  $\overline{CE} < CE_{\text{desejada}} - 0,1 \rightarrow$  então:  $\xi_{\text{controle}} = +0,03$

Senão  $\xi_{\text{controle}} = 0$

No primeiro dia de funcionamento do sistema automático, a variável  $CE_{\text{corr}}$  foi admitida como sendo igual a  $CE_{\text{desejada}}$ . A histerese proporcionada pelo parâmetro 0,1, impediu a correção desnecessária da condutividade

elétrica nos dias em que a sua variação não resultou em alterações significativas ( $2,9 \leq \overline{CE} \leq 3,1 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Neste trabalho, considerou-se que o volume de areia ocupado pelas raízes do tomateiro em estágio final de desenvolvimento seria de, aproximadamente,  $1.000 \text{ cm}^3$  ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ ). O referido volume estaria posicionado a uma altura média de 17 cm a partir do fundo do vaso de cultivo que possuía uma altura total, formada pelo conjunto cascalho-areia, de 20 cm. Estas considerações basearam-se nos resultados obtidos em experimento prévio, conduzido em casa de vegetação, onde foram cultivadas plantas de tomate (híbrido Duradoro) em substrato de areia com granulometria e volume idênticos ao do presente trabalho.

Com base no volume de saturação, obtido a partir da curva de retenção de água e da densidade aparente da areia, a estratégia de controle foi estabelecida de maneira a permitir uma depleção neste volume de, no máximo, 25%. Ou seja, o sistema automático acionava as bombas de preparo e, posteriormente, de fertirrigação quando o volume de solução nutritiva armazenada no vaso de cultivo atingia 75% do volume consumido para saturar completamente o mesmo na altura de 17 cm (equação 8). Este procedimento baseou-se na recomendação mencionada por PEREIRA e MARTINEZ (1999) de fertirrigar as plantas quando ocorrerem perdas de 75 a 85% do volume de solução necessário à saturação do substrato. A depleção de 25% era identificada pelo sistema de controle quando o acúmulo dos valores estimados de transpiração totalizava um volume igual ou imediatamente superior ao calculado pela equação 9 ( $V_{\text{rep}}$ ).

$$V_{\text{min}} = 0,75 V_{\text{sat}} \quad (\text{equação 8})$$

em que,

$V_{\text{min}}$  - volume mínimo de solução nutritiva no vaso de cultivo permitido pelo sistema automático, ml;

$V_{\text{sat}}$  - volume de solução nutritiva suficiente para saturar  $1000 \text{ cm}^3$  de areia acondicionada no vaso de cultivo, na altura média de 17 cm, ml.

A fim de restabelecer a condição de saturação do substrato, o volume de solução nutritiva a ser repostado por planta em cada evento de fertirrigação ( $V_{\text{rep}}$ ) era calculado por meio da equação 9.

$$V_{\text{rep}} = V_{\text{sat}} - V_{\text{min}} \quad (\text{equação 9})$$

em que,

$V_{\text{rep}}$  - volume de reposição de solução nutritiva por planta em cada evento de fertirrigação, ml planta<sup>-1</sup>.

Conforme justificado no item 4.2.3, era aplicado um excesso de 20% em relação ao volume restituído de solução nutritiva para cada planta de tomate (equação 10).

$$V_{\text{ferti}} = 1,2 V_{\text{rep}} \quad (\text{equação 10})$$

em que,

$V_{\text{ferti}}$  - volume de solução nutritiva aplicado em cada planta de tomate, considerando-se um excesso de 20%, ml planta<sup>-1</sup>.

O volume total de solução nutritiva aplicado, em cada evento de fertirrigação, nas 32 plantas de tomate que constituíram o sistema automático foi determinado por meio da equação 11.

$$V_{\text{total}} = N_{\text{planta}} V_{\text{ferti}} \quad (\text{equação 11})$$

em que,

$V_{\text{total}}$  - volume total de solução nutritiva aplicado em cada fertirrigação, ml;

$N_{\text{planta}}$  - número total de plantas de tomate referentes ao sistema automático, 32 unidades.

Para amortecer as oscilações resultantes da alteração diária da condutividade elétrica da solução a ser preparada, o reservatório de preparo continha, aproximadamente, 20 L de solução nutritiva além do volume total consumido em uma fertirrigação ( $V_{\text{total}}$ ).

Inicialmente, admitiu-se que os volumes de soluções-estoque concentradas A e B, adicionadas no reservatório de preparo, eram idênticos ( $V_{\text{sol A}} = V_{\text{sol B}} = V_{\text{sol}}$ ) e que o volume de água injetado neste mesmo tanque era aproximadamente igual ao volume de solução nutritiva aplicado às plantas em cada evento de fertirrigação ( $V_{\text{água}} \approx V_{\text{total}}$ ). Assim sendo, a primeira estimativa do volume individual de solução-estoque A e B era obtida pela equação 12.

$$V_{\text{sol}} = \frac{(CE_{\text{corr } i} - CE_{\text{água}}) V_{\text{total}}}{CE_{\text{sol } A} + CE_{\text{sol } B}} \quad (\text{equação 12})$$

em que,

$V_{\text{sol}}$  - volume individual de solução-estoque concentrada A e B, ml;

$CE_{\text{água}}$  - condutividade elétrica da água, dS m<sup>-1</sup>;

$CE_{\text{sol } A}$  - condutividade elétrica da solução-estoque A, dS m<sup>-1</sup>;

$CE_{\text{sol } B}$  - condutividade elétrica da solução-estoque B, dS m<sup>-1</sup>.

Apesar de cada solução-estoque ter sido formulada com concentração de 50 vezes e, por essa razão, o volume individual de solução-estoque A e B, adicionado nos momentos de preparo da solução nutritiva, ser reduzido, o volume de água aplicado era, na realidade, um pouco menor do que o volume total de solução nutritiva. Desta maneira, os volumes de água e de soluções-estoque concentradas A e B foram calculados por meio das equações 13 e 14, respectivamente.

$$V_{\text{água}} = V_{\text{total}} - (2 V_{\text{sol}}) \quad (\text{equação 13})$$

em que,

$V_{\text{água}}$  - volume de água adicionado no reservatório de preparo antes de cada evento de fertirrigação, ml.

$$V_{\text{sol}} = \frac{(CE_{\text{corr } i} V_{\text{total}}) - (CE_{\text{água}} V_{\text{água}})}{CE_{\text{sol } A} + CE_{\text{sol } B}} \quad (\text{equação 14})$$

Os intervalos de tempo nos quais o sistema automático manteve acionadas as bombas de injeção de soluções-estoque A e B (equações 15 e 16), nos momentos de preparo da solução nutritiva, foram obtidos utilizando-se as vazões médias destas bombas.

$$\Delta T_{\text{sol } A} = \frac{V_{\text{sol}}}{Q_{\text{sol } A}} \quad (\text{equação 15})$$

em que,

$\Delta T_{\text{sol } A}$  - tempo de acionamento da bomba de solução-estoque A, s;

$Q_{\text{sol } A}$  - vazão média da bomba de injeção de solução-estoque A, ml s<sup>-1</sup>.

$$\Delta T_{\text{sol B}} = \frac{V_{\text{sol}}}{Q_{\text{sol B}}} \quad (\text{equação 16})$$

em que,

$\Delta T_{\text{sol B}}$  - tempo de acionamento da bomba de solução-estoque B, s;

$Q_{\text{sol B}}$  - vazão média da bomba de injeção de solução-estoque B, ml s<sup>-1</sup>.

Os tempos de acionamento da bomba de água e de fertirrigação foram obtidos por meio das equações 17 e 18, que consideram a vazão média da bomba de água e a vazão média das 32 estacas gotejadoras referentes às plantas do sistema automático, respectivamente.

$$\Delta T_{\text{água}} = \frac{V_{\text{água}}}{Q_{\text{água}}} \quad (\text{equação 17})$$

em que,

$\Delta T_{\text{água}}$  - tempo de acionamento da bomba de injeção de água, s;

$Q_{\text{água}}$  - vazão média da bomba de injeção de água, ml s<sup>-1</sup>.

$$\Delta T_{\text{ferti}} = \frac{V_{\text{ferti}}}{Q_{\text{ferti}}} \quad (\text{equação 18})$$

em que,

$\Delta T_{\text{ferti}}$  - tempo de acionamento da bomba de fertirrigação, s;

$Q_{\text{ferti}}$  - vazão média das estacas gotejadoras do sistema automático, ml s<sup>-1</sup>.

Diariamente, ao longo de todo o período após o transplante, o programa computacional HidroControle gerou um novo arquivo no qual foram gravados os horários e as durações dos acionamentos das bombas de soluções-estoque A e B, água e fertirrigação.

#### **4.2.4.3. Estratégia de controle da frequência de aplicação de soluções nutritivas**

##### **4.2.4.3.1. Modelo de estimativa de transpiração em casa de vegetação**

A estimativa da transpiração para a cultura do tomateiro, principal variável no procedimento de tomada de decisão referente à frequência de

aplicação das soluções nutritivas, baseou-se no modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), padronizado pela FAO em 1998.

Segundo HARMANTO et al. (2005) e RINALDI et al. (2007), a maneira mais adequada para controlar a irrigação na produção de tomates é com base na demanda hídrica da cultura, representada pelas estimativas de evapotranspiração obtidas a partir do modelo de Penman-Monteith.

Algumas equações de estimativa das variáveis do modelo de Penman-Monteith, especificamente as associadas ao balanço de ondas longas, resistência aerodinâmica e coeficientes de cultura, foram substituídas em relação às propostas pela FAO com o objetivo de propiciar estimativas mais próximas das reais condições de transpiração do tomateiro em casa de vegetação.

Conforme mencionado no item 4.2.1, a área de areia em torno do caule foi revestida com um filme plástico transparente a fim de minimizar as perdas por evaporação. Assim, as estimativas de evapotranspiração da cultura do tomateiro representaram somente a transpiração das plantas.

A determinação dos intervalos de tempo entre os eventos de aplicação da solução nutritiva com base nas estimativas de transpiração foi fundamental para evitar fertirrigações excessivas em dias nublados e o estresse hídrico em dias de elevado consumo de água pelas plantas.

As equações 19, 21, 23, 24, 25, 29 e 31, descritas a seguir, foram apresentadas por ALLEN et al. (1998).

O balanço de radiação ( $R_n$ ), variável representativa da energia disponível no interior da casa de vegetação, foi estimado por meio das equações 19, 20 e 21.

$$B_{oc} = (1 - \alpha) R_g \quad \text{(equação 19)}$$

em que,

$B_{oc}$  - balanço de ondas curtas,  $W m^{-2}$ ;

$\alpha$  - albedo da cultura de referência (grama), 0,23;

$R_g$  - radiação solar global medida por meio do piranômetro,  $W m^{-2}$ .

A estimativa do balanço de ondas longas ( $B_{ol}$ ) foi calculada a partir da equação 20, proposta por WALKER et al. (1983).

$$B_{ol} = \varepsilon_s \zeta \delta [(t_{int} + 273,15)^4 - \varepsilon_a (t_{ext} + 273,15)^4] \quad (\text{equação 20})$$

em que,

$B_{ol}$  - balanço de ondas longas,  $W m^{-2}$ ;

$\varepsilon_s$  - emissividade média das superfícies internas à casa de vegetação, 0,85;

$\zeta$  - transmitância térmica, 0,80;

$\delta$  - constante de Stefan-Boltzmann,  $5,6697 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ;

$t_{int}$  - temperatura do ar interno à casa de vegetação, °C;

$\varepsilon_a$  - emissividade atmosférica aparente, 0,86;

$t_{ext}$  - temperatura do ar externo à casa de vegetação, °C.

$$R_n = B_{oc} + B_{ol} \quad (\text{equação 21})$$

em que,

$R_n$  - balanço de radiação,  $W m^{-2}$ .

Devido à transpiração ter sido estimada em curtos intervalos de tempo, o fluxo de calor no substrato (G) foi calculado com base no balanço de radiação (ALLEN et al., 1998), de acordo com a seguinte condição:

Se  $R_n > 0 \rightarrow$  então:  $G = 0,1 R_n$       senão:  $G = 0,5 R_n$

em que,

G - fluxo de calor no substrato,  $W m^{-2}$ .

A pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar interno ( $e_s$ ), conforme a proposição de Tetens citada por ZOLNIER et al. 2000, e a pressão real do vapor d'água à temperatura do ar interno ( $e_a$ ) foram determinadas por meio das equações 22 e 23, respectivamente.

$$e_s = 6,1078 \times 10^{[(7,5 t_{int}) / (237,3 + t_{int})]} \quad (\text{equação 22})$$

$$e_a = \frac{UR_{int} e_s}{100} \quad (\text{equação 23})$$

em que,

$e_s$  - pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar interno, hPa;

$e_a$  - pressão real do vapor d'água à temperatura do ar interno, hPa;

$UR_{int}$  - umidade relativa do ar interno, %.

O déficit de pressão do vapor d'água no ar interno à casa de vegetação (DPV<sub>ar</sub>) foi calculado pela equação 24.

$$DPV_{ar} = (e_s - e_a) 100 \quad (\text{equação 24})$$

em que,

DPV<sub>ar</sub> - déficit de pressão do vapor d'água no ar interno, Pa.

A pressão atmosférica local (P<sub>atm</sub>) foi estimada por meio da equação 25, considerando a altitude média do município de Viçosa - MG onde está localizada a casa de vegetação utilizada no experimento.

$$P_{atm} = 1013 \frac{(293 - 0,0065 z)^{5,26}}{293^{5,26}} \quad (\text{equação 25})$$

em que,

P<sub>atm</sub> - pressão atmosférica local, hPa;

z - altitude média do município de Viçosa - MG, 670 m.

A densidade absoluta do ar (ρ<sub>ar</sub>), representada pela soma das densidades absolutas do vapor d'água e do ar seco, foi determinada pela equação 26.

$$\rho_{ar} = \frac{348,37 P_{atm} - 131,69 e_a}{1000 (t_{int} + 273,15)} \quad (\text{equação 26})$$

em que,

ρ<sub>ar</sub> - densidade absoluta do ar, kg<sub>ar</sub> m<sub>ar</sub><sup>-3</sup>.

A inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água (Δ) foi estimada pela derivada da equação de Tetens em relação à temperatura do ar interno, resultando na equação 27.

$$\Delta = \frac{de_s}{dt_{int}} = 6,1078 \times 10^{[(7,5 t_{int}) / (237,3 + t_{int})]} \frac{409802,58}{(237,3 + t_{int})^2} \quad (\text{equação 27})$$

em que,

Δ - inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água, Pa °C<sup>-1</sup>.

O calor latente de evaporação (L), variável representativa da energia requerida para a mudança de estado (líquido para gasoso) de uma unidade de massa de água à temperatura e pressão constantes, foi calculado por meio da equação 28.

$$L = 2,5 \times 10^6 - 2370 t_{\text{int}} \quad (\text{equação 28})$$

em que,

L - calor latente de evaporação, J kg<sup>-1</sup>.

O coeficiente psicrométrico ( $\gamma$ ) foi obtido pela equação 29.

$$\gamma = \frac{c_{\text{par}} P_{\text{atm}} 100}{0,622 L} \quad (\text{equação 29})$$

em que,

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico, Pa °C<sup>-1</sup>;

$c_{\text{par}}$  - calor específico do ar à pressão constante, 1007 J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>.

A evapotranspiração da cultura de referência (ET<sub>o</sub>), conforme o modelo de Penman-Monteith padronizado pela FAO em 1998, foi estimada por meio da equação 30.

$$ET_o = \frac{\Delta (R_n - G) + (\rho_{\text{ar}} c_{\text{par}} DPV_{\text{ar}} r_a^{-1})}{\Delta + \gamma [1 + (r_c r_a^{-1})]} \quad (\text{equação 30})$$

em que,

ET<sub>o</sub> - evapotranspiração da cultura de referência, W m<sup>-2</sup>;

r<sub>a</sub> - resistência aerodinâmica, s m<sup>-1</sup>;

r<sub>c</sub> - resistência de superfície da cultura, s m<sup>-1</sup>.

A evapotranspiração da cultura do tomateiro (ET<sub>c</sub>), expressa em termos de energia por unidade de área, foi calculada pela equação 31.

$$ET_c = K_c ET_o \quad (\text{equação 31})$$

em que,

ET<sub>c</sub> - evapotranspiração da cultura do tomateiro, W m<sup>-2</sup>;

K<sub>c</sub> - coeficiente da cultura do tomateiro, adimensional.

A densidade de plantio das mudas de tomate, de acordo com a disposição dos vasos de cultivo no interior da casa de vegetação, foi de 2 plantas  $m^{-2}$  e a densidade específica da solução nutritiva foi considerada igual a  $1 \text{ kg dm}^{-3}$ . Com base nestas densidades, as estimativas da evapotranspiração da cultura do tomateiro foram expressas em volume por unidade de tempo, sendo convertidas pela equação 32.

$$ET_{cv} = \frac{30000 ET_c}{L} \quad (\text{equação 32})$$

em que,

$ET_{cv}$  - evapotranspiração da cultura do tomateiro,  $\text{ml planta}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

A partir das variáveis micrometeorológicas medidas por meio dos sensores, o programa HidroControle estimava a evapotranspiração da cultura do tomateiro em intervalos de tempo de um minuto. As estimativas de  $ET_{cv}$  foram somadas até que o valor total acumulado fosse maior ou igual ao volume de solução nutritiva a ser repostado por planta em cada evento de fertirrigação ( $V_{rep}$ ), calculado por meio da equação 9. Nestes momentos, o sistema automático iniciava o procedimento de cálculo dos volumes a serem adicionados no reservatório de preparo e, posteriormente, acionava as bombas de injeção de soluções-estoque A e B, água e fertirrigação. No minuto seguinte ao início da operação de preparo da solução, a variável responsável pelo acúmulo dos valores de  $ET_{cv}$  retornava a zero e a soma era reiniciada com as novas estimativas.

#### **4.2.4.3.2. Estimativa da resistência aerodinâmica em casa de vegetação**

A evapotranspiração da cultura de referência, baseada no modelo de Penman-Monteith, foi definida por ALLEN et al. (1998) como sendo o consumo de água de uma superfície completamente coberta por grama com características hipotéticas: altura uniforme de 0,12 m, em fase de crescimento ativo, bem irrigada, com resistência de superfície da cultura de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo igual a 0,23. A partir destas características, estes pesquisadores propuseram que a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) poderia ser estimada como sendo igual à relação:  $208 u_2^{-1}$ , em que  $u_2$  é a velocidade do ar medida a 2 m

de altura. Embora a equação de Penman-Monteith, padronizada por ALLEN et al. (1998), proporcione estimativas precisas em condições de campo aberto, a equação de estimativa da resistência aerodinâmica é extremamente sensível às baixas velocidades do ar, tipicamente constatadas em casas de vegetação.

Com a finalidade de que a resistência aerodinâmica fosse estimada de maneira mais adequada às condições de casa de vegetação, a equação de Penman-Monteith foi reescrita em termos do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ), proposto por McNAUGHTON e JARVIS (1983), conforme a equação 33.

$$ET_o = \Omega ET_{eq} + (1 - \Omega) ET_{im} \quad (\text{equação 33})$$

em que,

$ET_o$  - evapotranspiração da cultura de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

$\Omega$  - fator de desacoplamento, adimensional;

$ET_{eq}$  - evapotranspiração de equilíbrio, mm dia<sup>-1</sup>;

$ET_{im}$  - evapotranspiração imposta pelo ar, mm dia<sup>-1</sup>.

O fator de desacoplamento, representativo do nível de interação entre a atmosfera e a cultura, a evapotranspiração de equilíbrio e a evapotranspiração imposta pelo ar (McNAUGHTON e JARVIS, 1983) foram estimados pelas equações 34, 35 e 36, respectivamente.

$$\Omega = \{1 + [\gamma (\Delta + \gamma)^{-1}] (r_c r_a^{-1})\}^{-1} \quad (\text{equação 34})$$

$$ET_{eq} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (\text{equação 35})$$

$$ET_{im} = \frac{\rho_{ar} c_{p_{ar}} DPV_{ar}}{\gamma r_c} \quad (\text{equação 36})$$

em que,

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico, kPa K<sup>-1</sup>;

$\Delta$  - inclinação da curva de pressão de saturação do vapor, kPa K<sup>-1</sup>;

$R_n$  - balanço de radiação, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

$G$  - fluxo de calor no substrato, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

$c_{p_{ar}}$  - calor específico do ar à pressão constante, kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;

$DPV_{ar}$  - déficit de pressão do vapor d'água no ar, kPa.

Nas situações em que toda a energia necessária ao processo de evapotranspiração provém do ar, onde se estabelece uma perfeita interação entre a atmosfera e o dossel vegetativo, o fator de desacoplamento tende para zero (PEREIRA, 2004). Em contraste, o dossel estará isolado da atmosfera quando o termo radiativo fornecer toda a energia para a evapotranspiração ( $\Omega = 1$ ).

De acordo com McNAUGHTON e JARVIS (1983), o fator de desacoplamento médio para uma superfície de grama, com as mesmas características hipotéticas consideradas por ALLEN et al. (1998), terá valor aproximado de 0,8, significando que a evapotranspiração de equilíbrio corresponde a 80% da evapotranspiração total. Assim sendo, admitindo-se na equação 34, a resistência de superfície da cultura fixa em  $70 \text{ s m}^{-1}$  e o fator de desacoplamento de 0,8, a resistência aerodinâmica pôde ser estimada por meio da equação 37.

$$r_a = \frac{280 \Delta}{\Delta + \gamma} \quad (\text{equação 37})$$

em que,

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico,  $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta$  - inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água,  $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

É importante ressaltar que, diferentemente da equação de estimativa de  $r_a$  proposta por ALLEN et al. (1998), a resistência aerodinâmica calculada pela equação 37 não tende para o infinito quando a velocidade do ar tende para zero ou para valores extremamente baixos. Com a utilização do fator de desacoplamento, o modelo de Penman-Monteith aplicado para casas de vegetação é simplificado, pois medições de velocidade do ar não são mais requeridas para se estimar a resistência aerodinâmica e, conseqüentemente, a evapotranspiração.

#### 4.2.4.3.3. Coeficientes da cultura do tomateiro

Os coeficientes da cultura do tomateiro ( $K_c$ ) foram estimados com base no tempo térmico representado pela somatória dos graus-dia após o transplântio das mudas para os vasos de cultivo. Segundo WANG (1960), citado por JONES (1992), o conceito de graus-dia (tempo térmico) vêm sendo usado em estudos fenológicos em substituição ao tempo cronológico a mais de 200 anos.

O cálculo dos graus-dia (GD), considerando a temperatura base ( $T_b$ ) da cultura do tomateiro igual a 10 °C (WOLF et al., 1986; JONES et al., 1989), foi realizado a partir da equação 38 descrita por JONES (1992).

$$GD = \frac{\sum_{i=1}^n t_{int}}{n} - T_b \quad (\text{equação 38})$$

em que,

GD - graus-dia, °C;

n - número de minutos correspondente a 1 dia, 1.440 min;

$T_b$  - temperatura basal inferior para a cultura do tomateiro, 10 °C.

Diariamente, o HidroControle calculou o valor dos graus-dia ao término dos 1.440 minutos, realizando na seqüência a soma do mesmo com o valor acumulado nos dias anteriores ( $GD_{acum}$ ) por meio da equação 39.

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^d GD \quad (\text{equação 39})$$

em que,

$GD_{acum}$  - graus-dia acumulados após o transplântio das mudas, °C;

d - número de dias correspondente ao período experimental, 121 dias.

A equação de estimativa do  $K_c$  para a cultura do tomateiro foi gerada por meio de um modelo de regressão sigmoidal com três parâmetros (equação 40). Nesta análise de regressão, foram relacionados os graus-dia acumulados após o transplântio com os coeficientes da cultura obtidos pela relação  $ET_c/ET_o$  em experimento prévio, onde foram cultivadas, sob condições de casa de

vegetação, plantas de tomate (híbrido Duradoro) em substrato de areia revestido na superfície com filme plástico transparente (*mulching*).

$$K_c = \frac{a (\pm SE_a)}{1 + \exp[- (GD_{acum} - b (\pm SE_b)) (c (\pm SE_c))^{-1}]}$$
 (equação 40)

em que,

$GD_{acum}$  - graus-dia acumulados, °C;

a, b, c - parâmetros da equação de regressão, adimensionais;

$SE_i$  - desvio padrão associado ao parâmetro i, i = a, b, c.

O valor inicial adotado para o  $K_c$ , no primeiro dia após o transplântio das mudas de tomate para os vasos de cultivo, foi de 0,1.

Como o estágio de desenvolvimento da cultura se constitui em uma das variáveis que influenciam diretamente a demanda hídrica das plantas, a equação de estimativa dos coeficientes da cultura, integrante da estratégia de controle do sistema automático, foi utilizada com a finalidade de ajustar a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e, assim, possibilitar a obtenção de estimativas da evapotranspiração da cultura do tomateiro ( $ET_c$ ).

Os fluxogramas detalhados com as principais operações, associadas ao sistema automático e gerenciadas pelo HidroControle, são apresentados nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20.

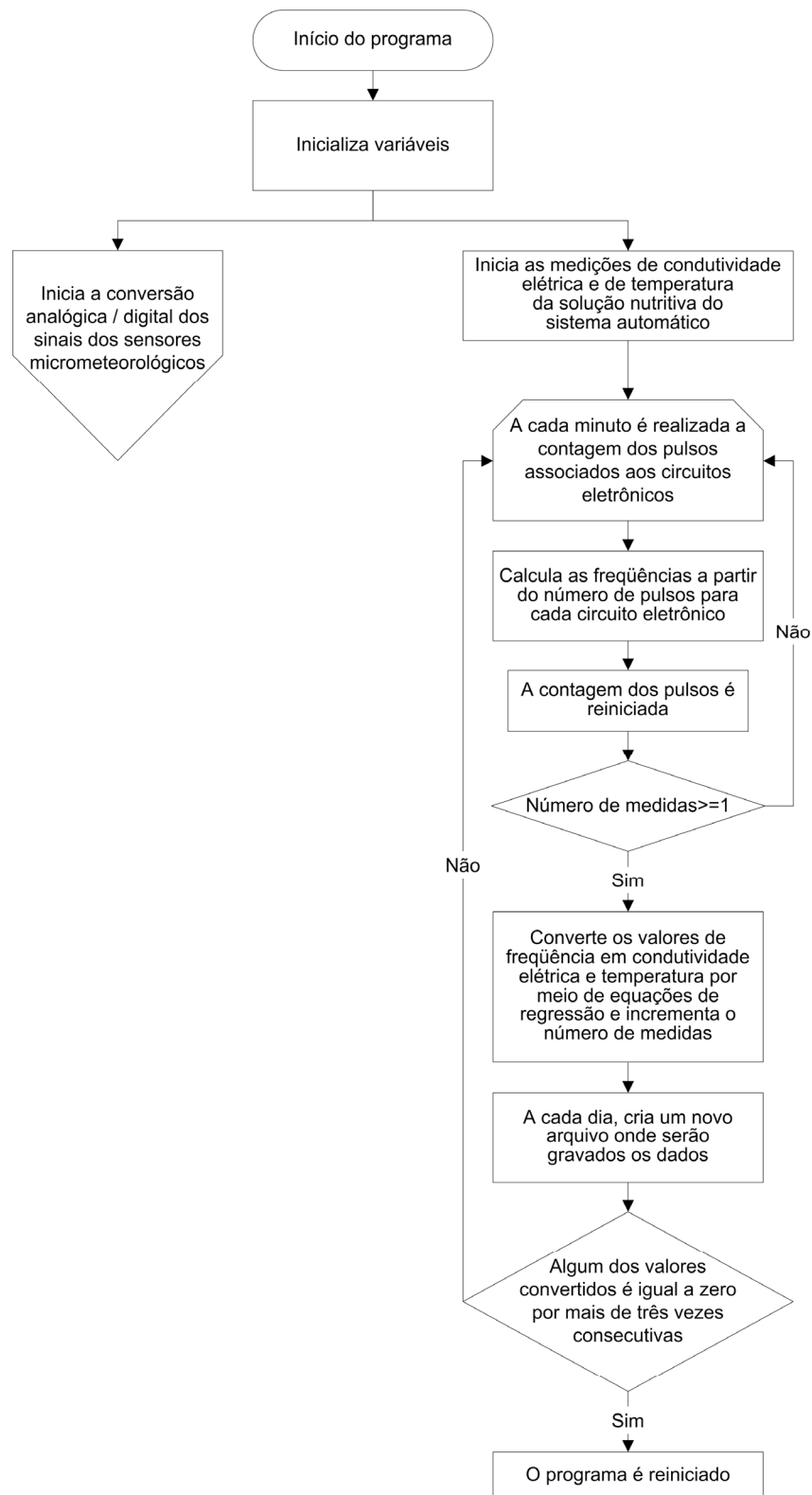


Figura 4.18. Fluxograma dos procedimentos, executados pelo HidroControle, associados às medições de condutividade elétrica e de temperatura da solução nutritiva do sistema automático.

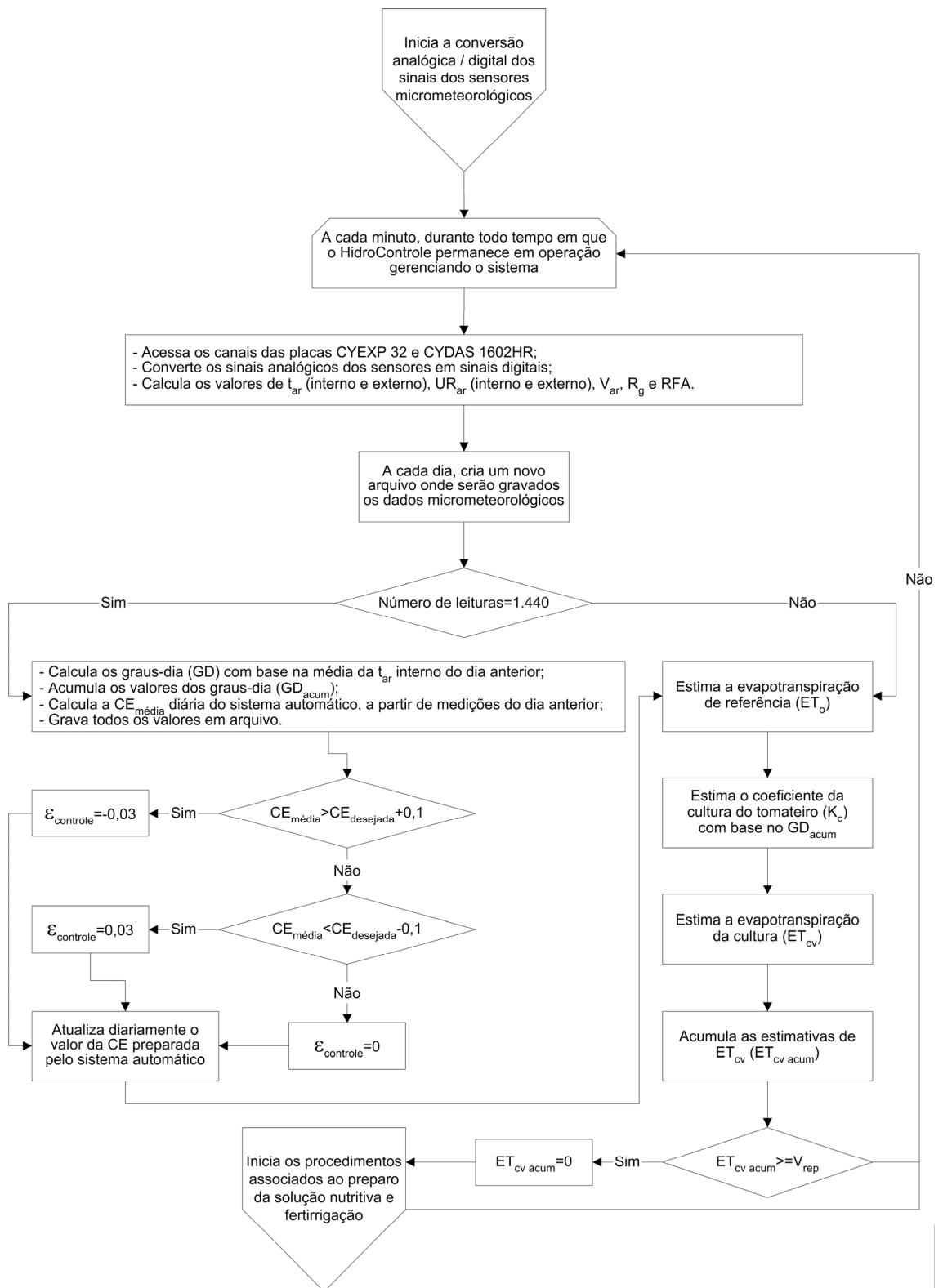


Figura 4.19. Fluxograma dos procedimentos, executados pelo HidroControl, associados à aquisição de dados micrometeorológicos, à estratégia de decisão da condutividade elétrica de preparo da solução nutritiva e à estimativa da evapotranspiração da cultura do tomateiro.

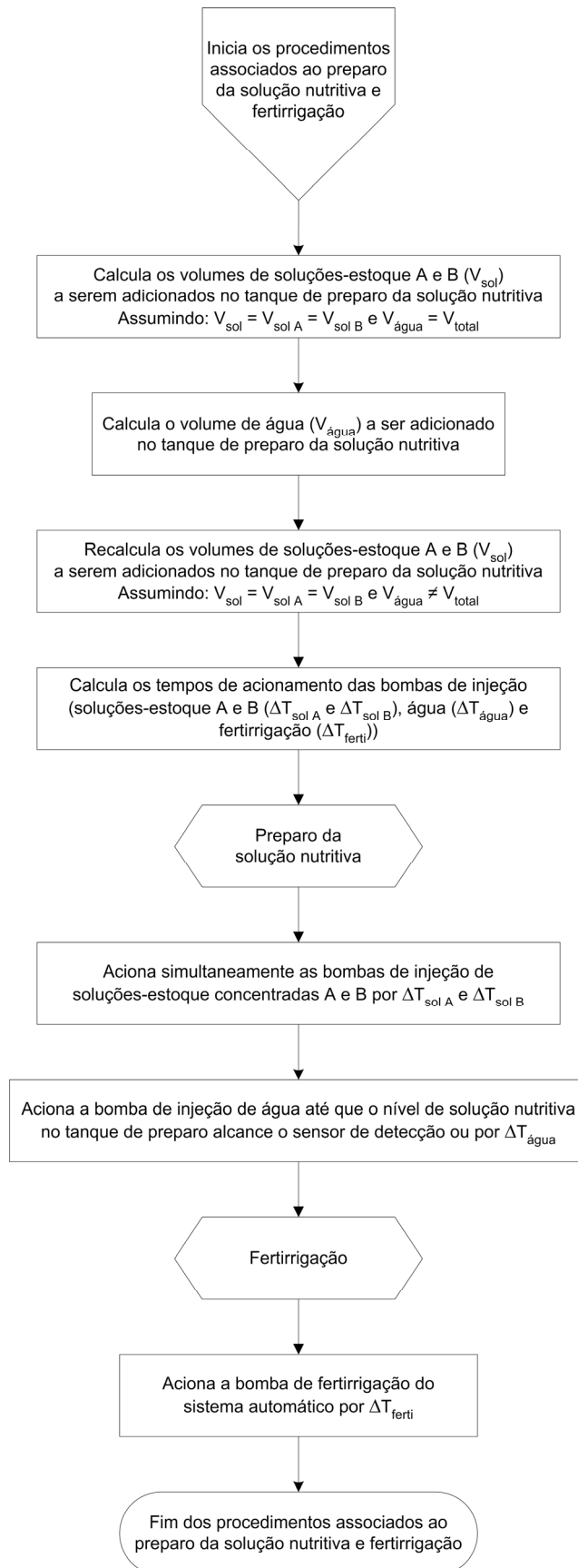


Figura 4.20. Fluxograma dos procedimentos, executados pelo HidroControle, associados ao preparo da solução nutritiva e à fertirrigação das plantas do sistema automático.

### 4.3. Implementação de um sistema convencional (temporizado) de controle aplicado ao cultivo do tomateiro em casa de vegetação

O sistema convencional foi constituído por dois reservatórios plásticos, com capacidade individual para aproximadamente 100 L, destinados ao armazenamento de solução nutritiva preparada manualmente. Estes reservatórios foram interligados na parte lateral inferior por meio de mangueira flexível de 3/4". Nesta interligação, foi conectada uma bomba de fertirrigação (eletrobomba de drenagem, P. Monti, São Paulo, SP), controlada por temporizador associado a um relé eletromecânico (Flash, São Paulo, SP), responsável pelo recalque da solução nutritiva até a extremidade final dos microtubos onde estavam encaixadas as 32 estacas gotejadoras do sistema convencional.

Na Figura 4.21 é apresentado o conjunto completo do sistema convencional para aplicação de soluções nutritivas.



Figura 4.21. Reservatórios de armazenamento de solução nutritiva e bomba de fertirrigação do sistema convencional com controle temporizado.

Diferentemente do sistema automático, a solução nutritiva aplicada às plantas do sistema convencional foi preparada manualmente com condutividade elétrica fixa de  $3 \text{ dS m}^{-1}$ , em intervalos regulares de quatro dias. Nos momentos de preparo, o volume restante de solução nutritiva nos reservatórios era determinado e, em seguida, realizavam-se os cálculos dos

volumes de água e soluções-estoque A e B (50 vezes concentradas) a serem adicionados para preencher completamente os reservatórios. Os volumes de soluções-estoque A e B foram retirados individualmente de dois tanques posicionados em cima de uma bancada, sendo medidos com o auxílio de provetas de 1.000 e 200 ml.

Apesar de não ter propósito de controle, sendo apenas para fins de comparação com o sistema automático, a concentração da solução nutritiva drenada nos vasos do sistema convencional foi monitorada em tempo real por meio de uma célula de condutividade elétrica cujos terminais foram conectados a circuitos eletrônicos descritos no item 4.1.

A semelhança do sistema automático, a célula de condutividade elétrica foi inserida no interior de um conjunto formado por uma peça de borracha flexível e por conexões de PVC. O referido conjunto foi encaixado em uma das extremidades de um dos perfis hidropônicos utilizados como calha para a coleta da solução drenada nos vasos associados ao sistema convencional. Parte do excesso de solução percolada foi retida neste conjunto, mantendo os eletrodos da célula constantemente imersos.

#### **4.3.1. Estratégia de controle do sistema convencional**

A estratégia de controle do sistema convencional foi elaborada de maneira que a frequência e a duração dos eventos de aplicação da solução nutritiva não considerassem as variáveis micrometeorológicas internas à casa de vegetação e os estádios de desenvolvimento da cultura. Assim sendo, conforme a maioria dos cultivos hidropônicos existentes no Brasil, a frequência e a duração das fertirrigações foram baseadas em um temporizador, sendo estabelecidas de acordo com a Tabela 4.2.

Adicionalmente, para que o intervalo de tempo entre a última irrigação do dia (19:00 horas) e a primeira irrigação do dia seguinte (7:00 horas) não fosse muito longo, a bomba de fertirrigação foi acionada diariamente às 24:00 horas a fim de realizar um único evento com duração de 100 segundos.

Ao invés de utilizar um temporizador especificamente para controlar as fertirrigações, optou-se por implementar, no mesmo programa de controle do sistema automático (HidroControle), um procedimento para controlar a bomba

de fertirrigação do sistema convencional com base em frequências e durações fixas (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Frequência e duração dos eventos diários de fertirrigação do sistema convencional, realizados ao longo de todo o período experimental.

Horário	Intervalo de tempo entre fertirrigações (minutos)	Duração de cada fertirrigação (segundos)
0:00 às 7:00 horas		sistema desligado
7:00 às 10:00 horas	30	100
10:00 às 16:00 horas	10	100
16:00 às 19:00 horas	30	100
19:00 às 24:00 horas		sistema desligado

Diariamente, ao longo de todo o período após o transplante, o HidroControle gerou um novo arquivo no qual foram gravados os horários e a duração dos acionamentos da bomba de fertirrigação do sistema convencional.

Ao propor eventos de fertirrigação com frequência diferenciada no sistema convencional, buscou-se atender, de maneira simplificada, a maior demanda hídrica da cultura nos horários do dia, normalmente, mais quentes (10:00 às 16:00 horas).

A duração de cada fertirrigação, fixada em 100 segundos, foi preestabelecida com base na vazão média das 32 estacas gotejadoras do sistema convencional e no consumo médio de solução nutritiva pelas plantas de tomate em estágio final de desenvolvimento. Neste consumo médio foram consideradas a capacidade de retenção de água da areia e a drenagem de solução nutritiva, obtidas em experimento prévio com o mesmo híbrido de tomate cultivado em areia sob condições de casa de vegetação.

O fluxograma detalhado com as principais operações, associadas ao sistema convencional e gerenciadas pelo HidroControle, é apresentado na Figura 4.22.

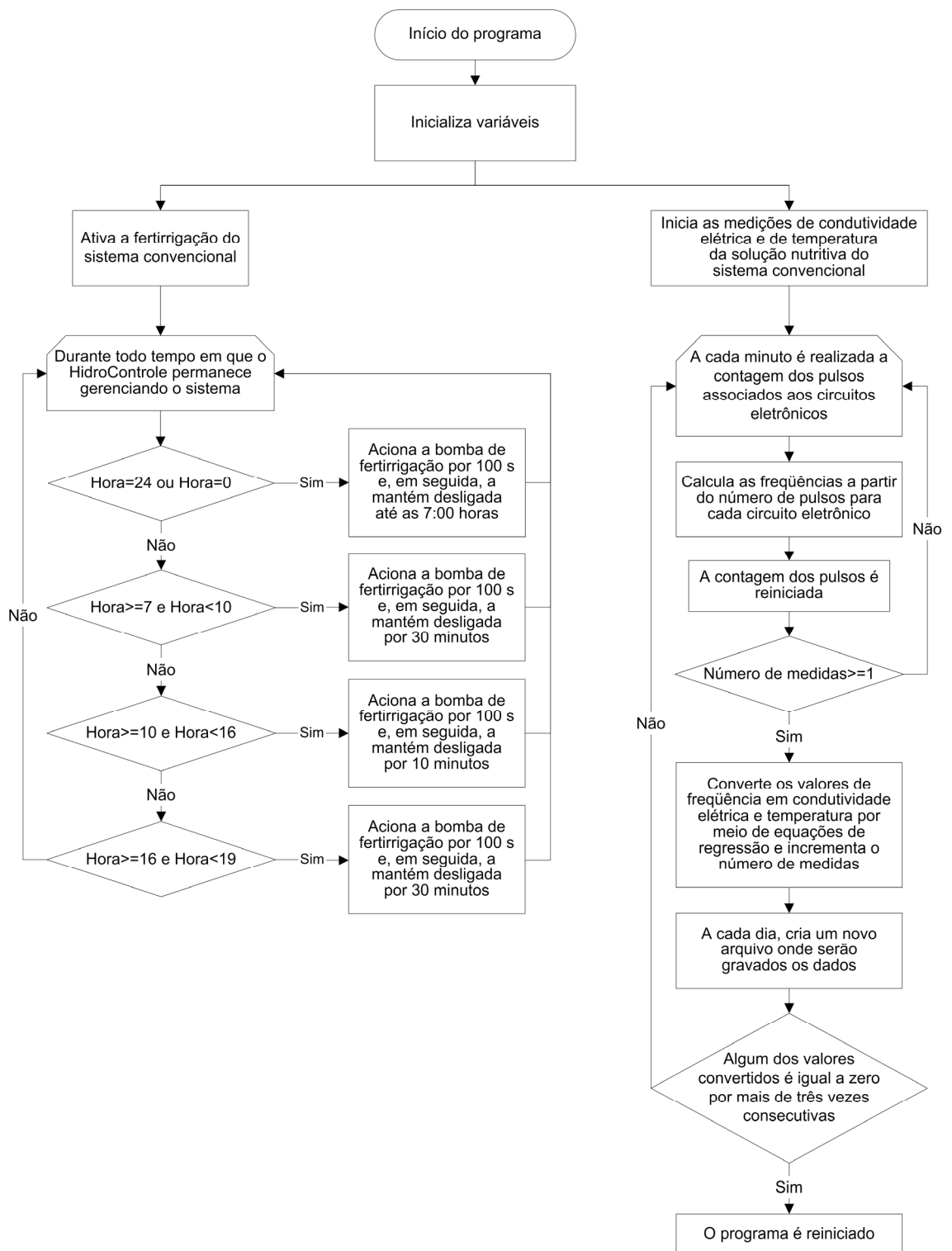


Figura 4.22. Fluxograma dos procedimentos, executados pelo HidroControl, associados ao controle (temporizado) da bomba de fertirrigação e às medições de condutividade elétrica e de temperatura da solução nutritiva do sistema convencional.

#### **4.4. Simulação da evapotranspiração da cultura do tomateiro**

As simulações da evapotranspiração da cultura do tomateiro foram realizadas, a partir dos graus-dia acumulados ( $GD_{\text{acum}}$ ), considerando-se condições típicas do balanço de radiação ( $R_n$ ) e do déficit de pressão do vapor d'água no ar interno ( $DPV_{\text{ar}}$ ). Tais condições, representativas do início da manhã, meio-dia e final da tarde, foram observadas durante a realização do experimento no interior da casa de vegetação. Os valores adotados para as simulações foram de  $100 \text{ W m}^{-2}$  para o balanço de radiação, combinado com os níveis de  $DPV_{\text{ar}}$  de 500, 1.000, 1.500 e 2.000 Pa, e o valor fixo de  $DPV_{\text{ar}}$  de 2.000 Pa, associado aos valores de  $R_n$  de 100, 200, 300 e  $400 \text{ W m}^{-2}$ .

A evapotranspiração da cultura de referência ( $ET_o$ ) foi estimada pela equação 30. Os valores de  $ET_c$  foram simulados, por meio da equação 31, de acordo com os estádios de desenvolvimento do tomateiro representados pela variação nos coeficientes da cultura (equação 40) ao longo de todo o ciclo.

#### **4.5. Medição de transpiração da cultura do tomateiro**

Medidas de transpiração das plantas de tomate foram realizadas com a finalidade de estabelecer comparações com os valores estimados pelo HidroControle por meio do modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith.

Para a determinação da transpiração da cultura do tomateiro foram utilizados 16 baldes plásticos cobertos por tampas, posicionados individualmente na extremidade final das calhas de coleta de solução nutritiva drenada. As medições foram realizadas durante sete dias consecutivos (08/10/2006 a 14/10/2006), além de dois outros dias adicionais (27/10/2006 e 29/10/2006), no horário das 8:00 às 18:00 horas.

Nos minutos que antecederiam o horário inicial de medição, os baldes eram completamente esvaziados e reposicionados sob as calhas, sendo as tampas de vedação dos mesmos conectadas nas calhas de coleta por meio de tubos de  $\frac{1}{2}$ " de PVC. Os baldes foram acumulando a solução nutritiva drenada até as 18:00 horas, a partir da qual foram pesados em balança eletrônica (modelo Standard MF 3, Filizola, São Paulo, SP) para a determinação do volume drenado, descontando-se as respectivas taras. Conforme mencionado

anteriormente, o volume drenado em cada balde de coleta correspondeu à drenagem de quatro plantas.

O volume diário de solução nutritiva aplicada ao longo do período de medição foi obtido pela multiplicação do volume consumido em cada fertirrigação, em um determinado conjunto de quatro plantas, com o número de eventos realizados das 8:00 às 18:00 horas neste mesmo conjunto.

A transpiração da cultura do tomateiro, em ml planta<sup>-1</sup>, foi calculada pela diferença entre o volume fertirrigado e o volume drenado, dividindo-se o resultado desta subtração pelo número de plantas associadas a cada calha de coleta. Posteriormente, determinaram-se os valores de transpiração média de cada conjunto de oito plantas de tomate correspondente a cada uma das repetições dos tratamentos.

#### **4.6. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes às fertirrigações e drenagens**

Avaliações comparativas entre os sistemas automático e convencional foram realizadas considerando-se as frações lixiviadas de solução nutritiva, concentrações das soluções drenadas, estratégias de controle, frequências de fertirrigações, volumes acumulados (fertirrigações e efluentes) e uso eficiente de água.

##### **4.6.1. Lixiviação e condutividade elétrica das soluções drenadas**

Devido à opção pelo cultivo hidropônico sem recirculação de solução nutritiva, as frações lixiviadas e as condutividades elétricas associadas aos volumes drenados foram consideradas importantes parâmetros de comparação entre os sistemas automático e convencional, visto que estes efluentes poderiam contribuir para a contaminação ambiental.

Ao longo de sete dias consecutivos (08/10/2006 a 14/10/2006), compreendidos no período de medição da transpiração, durante o horário das 8:00 às 18:00 horas, foram determinadas as frações lixiviadas e medidas as condutividades elétricas das soluções drenadas.

A fração lixiviada, referente a cada conjunto de quatro plantas de tomate, foi calculada pela razão entre o volume total de solução drenada, armazenada

no balde de coleta, e o volume total de solução aplicada no respectivo conjunto de plantas (KU e HERSHEY, 1992).

As medições de condutividade elétrica foram realizadas nas soluções drenadas que acumularam nos baldes de coleta até às 18:00 horas de cada dia, utilizando uma célula de condutividade elétrica conectada a um condutivímetro de bancada (modelo CG 853, Schott Geräte GmbH, Germany).

Na seqüência, foram determinadas as médias das frações lixiviadas e das condutividades das soluções drenadas para cada conjunto de oito plantas de tomate, correspondente a cada uma das repetições dos tratamentos.

#### **4.6.2. Influência das estratégias de controle e das variáveis micrometeorológicas sobre a condutividade elétrica dos efluentes**

Foi selecionado um intervalo de seis dias consecutivos (27/10/2006 a 01/11/2006), compreendido no período experimental de cultivo hidropônico do tomateiro, para serem realizadas avaliações comparativas entre os sistemas automático e convencional em relação às oscilações e tendências da condutividade elétrica das soluções nutritivas drenadas. Nestas avaliações, foram ressaltadas a influência exercida pelas estratégias de controle e pelas variáveis micrometeorológicas internas à casa de vegetação sobre a concentração dos efluentes. Adicionalmente, foram comparadas a frequência de fertirrigações do sistema automático, caracterizada em função das condições micrometeorológicas e dos estádios de desenvolvimento do tomateiro, com a frequência de fertirrigações do sistema convencional, preestabelecida com um número fixo de eventos diários ao longo de todo o ciclo da cultura.

#### **4.6.3. Frequências de fertirrigações em dias típicos de céu claro e de céu nublado**

Com o propósito de evidenciar as diferenças entre as frequências de fertirrigações e, conseqüentemente, entre os volumes totais diários de fertirrigações realizadas pelos sistemas automático e convencional, foram escolhidos dias típicos de céu claro e de céu nublado, associados aos estádios

inicial ( $K_c = 0,23$ ) e final ( $K_c = 0,91$ ) de desenvolvimento do tomateiro, com base nas curvas de distribuição da radiação solar global.

#### **4.6.4. Uso eficiente de água e volumes acumulados de fertirrigações e drenagens**

O Uso Eficiente de Água (UEA) permitiu comparar a contribuição das fertirrigações dos sistemas automático e convencional sobre as respectivas produtividades do tomateiro. Este parâmetro foi calculado individualmente para as quatro repetições de cada tratamento, dividindo-se a produtividade comercial média (kg) pelo volume total de fertirrigações ( $m^3$ ) realizadas ao longo do experimento, conforme descrito por INCROCCI et al. (2006) e MAROUELLI e SILVA (2006).

Os valores calculados do uso eficiente de água foram submetidos à análise de variância (ANOVA), empregando-se o teste “F” ao nível de 1% de probabilidade.

Para a determinação dos volumes acumulados de fertirrigações foram contabilizados, para cada sistema, o número de eventos de fertirrigação realizados em cada um dos 121 dias após o transplante. Além dos acionamentos, foram utilizados os volumes médios de solução nutritiva aplicada por planta em cada fertirrigação e tratamento. Já para os volumes acumulados de efluentes, foi considerada a drenagem preestabelecida na estratégia de controle do sistema automático e os volumes armazenados diariamente em cada um dos 16 baldes de coleta de solução drenada.

#### **4.7. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes aos frutos do tomateiro**

Comparações entre os sistemas automático e convencional foram realizadas avaliando-se os impactos destes na classificação por tamanho, no número de frutos comerciais, na produtividade e na qualidade dos frutos colhidos. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), empregando-se o teste “F” ao nível de 5% de probabilidade.

Apesar do tomate poder ser colhido a partir do ponto em que é atingida a maturidade fisiológica (fruto climatérico), caracterizada por uma mudança de

coloração externa de um verde opaco para um verde mais brilhante, optou-se pela colheita no estágio de amadurecimento, conhecido tecnicamente como rosa-esverdeado. Neste estágio, de acordo com ALVARENGA (2004), entre 10 e 30% do fruto possui coloração avermelhada, rósea ou amarelada, principalmente na extremidade estilar (distal) do fruto.

A colheita dos frutos foi realizada em intervalos regulares de uma semana, a partir da verificação visual de que alguns frutos haviam atingido o estágio rosa-esverdeado. O início da colheita foi no dia 29/09/2006 com término no dia 10/11/2006, totalizando sete colheitas. Cada fruto colhido foi devidamente identificado por uma etiqueta associada ao número da planta, número do cacho e posição dentro de um mesmo cacho.

Não houve descarte de frutos em função do ataque de pragas e doenças. Apesar de se ter constatado a proliferação da mosca-minadora (*Liriomyza huidobrensis*), durante a fase de produção das mudas de tomate, e a disseminação do mofo-cinza (*Botrytis cinerea*), no início do estágio de senescência das plantas, estes foram controlados e não causaram injúrias aos frutos do tomateiro.

#### 4.7.1. Classificação dos frutos por tamanho

A classificação por tamanho, conduzida em laboratório utilizando-se um paquímetro digital, baseou-se no regulamento técnico proposto pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2002), que considera o maior diâmetro transversal do fruto (Tabela 4.3). A produção comercial de frutos foi obtida pelo somatório das classes gigante, grande, médio e pequeno.

Tabela 4.3. Classificação referente ao tamanho para tomates do grupo redondo destinados ao consumo *in natura*.

Classe	Maior diâmetro transversal do fruto (mm)
Gigante	maior que 100
Grande	maior que 80 até 100
Médio	maior que 65 até 80
Pequeno	maior que 50 até 65

Fonte: BRASIL (2002).

Os tomates cujo maior diâmetro transversal era inferior a 50 mm, foram classificados como miúdos, sendo, portanto não comerciais. Entretanto, estes frutos foram contabilizados na determinação da produtividade total.

#### **4.7.2. Produtividade total e comercial da cultura do tomateiro**

Logo após o término de cada colheita, a massa fresca de cada fruto colhido foi determinada em laboratório por meio de uma balança de precisão (modelo AL 500, Marte, São Paulo, SP).

A produtividade média de cada repetição foi calculada dividindo-se a massa total de frutos pelo número de plantas. A produtividade total de cada tratamento, em  $\text{kg planta}^{-1}$ , foi a média das produtividades médias das quatro repetições. A produtividade comercial, associada aos sistemas automático e convencional, foi obtida de maneira semelhante a anterior. Entretanto, neste cálculo, foram consideradas apenas as massas frescas dos frutos classificados como gigante, grande, médio e pequeno.

A massa média de todos os frutos de cada tratamento, em  $\text{g fruto}^{-1}$ , foi determinada dividindo-se a produtividade média de cada repetição pelo número total de frutos por planta (30 tomates). Para os frutos comerciais, calculou-se a massa média para cada uma das classes descritas na Tabela 4.3.

#### **4.7.3. Sólidos solúveis totais (Brix)**

Os sólidos solúveis totais representam o teor de açúcares solúveis presente nos frutos. Do ponto de vista qualitativo, quanto maior for o teor de sólidos solúveis, melhor será o sabor do fruto. Segundo BARRETT et al. (1998), cultivos de tomateiro em casa de vegetação, utilizando-se solução nutritiva com condutividade elétrica alta, resultaram em acréscimos no teor de açúcares solúveis nos tomates. Assim, a análise dos sólidos solúveis totais foi escolhida como capaz de evidenciar o efeito de uma maior ou menor concentração da solução nutritiva na qualidade dos frutos.

As medições de sólidos solúveis totais foram realizadas em laboratório no primeiro fruto maduro do primeiro cacho de cada uma das 64 plantas de tomate. Cada fruto a ser analisado foi lavado em água tratada, adequadamente triturado e, o suco resultante foi homogeneizado. Antes de serem colocadas

individualmente em contato com a lente do refratômetro digital (modelo Q7670145, Quimis, São Paulo, SP) para medição de sólidos solúveis, três amostras (repetições) do suco obtido de cada tomate foram filtradas em algodão hidrofílico.

#### **4.7.4. Podridão apical (fundo preto)**

Em razão de ser um distúrbio fisiológico frequentemente evidenciado nos cultivos de tomate, estando associado à deficiência de cálcio, irrigações deficitárias ou excessivas e/ou altas concentrações de fertilizantes, a podridão apical (fundo preto) também foi utilizada para fins de comparação entre os sistemas automático e convencional.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Circuitos eletrônicos para medição de condutividade elétrica e temperatura de soluções nutritivas

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentados o conjunto para medição de condutividade elétrica e o diagrama eletrônico dos circuitos de condutividade (inferior) e de temperatura (superior), respectivamente. Como se pode notar no diagrama, os circuitos são simétricos, ou seja, possuem o mesmo número de componentes eletrônicos e a mesma disposição.

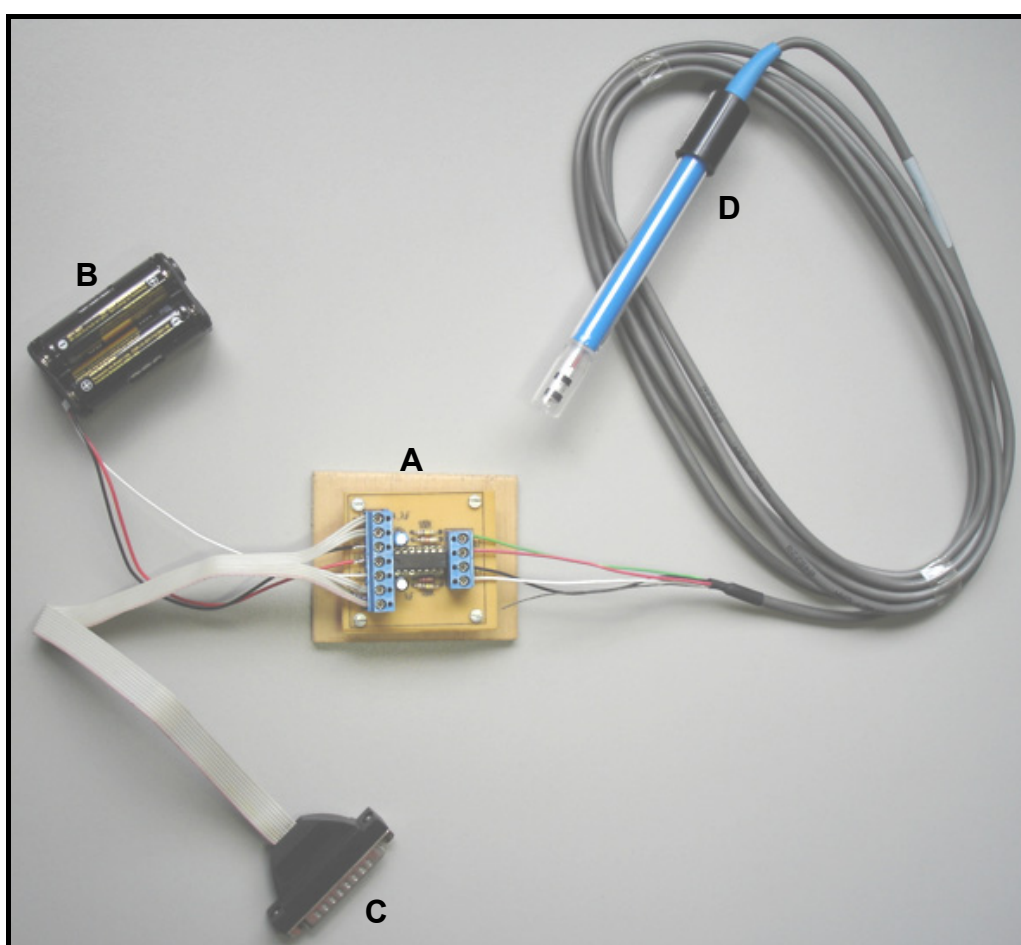


Figura 5.1. Equipamento para medição de condutividade elétrica de soluções nutritivas, constituído por circuitos eletrônicos (A), fonte de alimentação (B), interface paralela de conexão ao computador (C) e célula de condutividade elétrica (D).

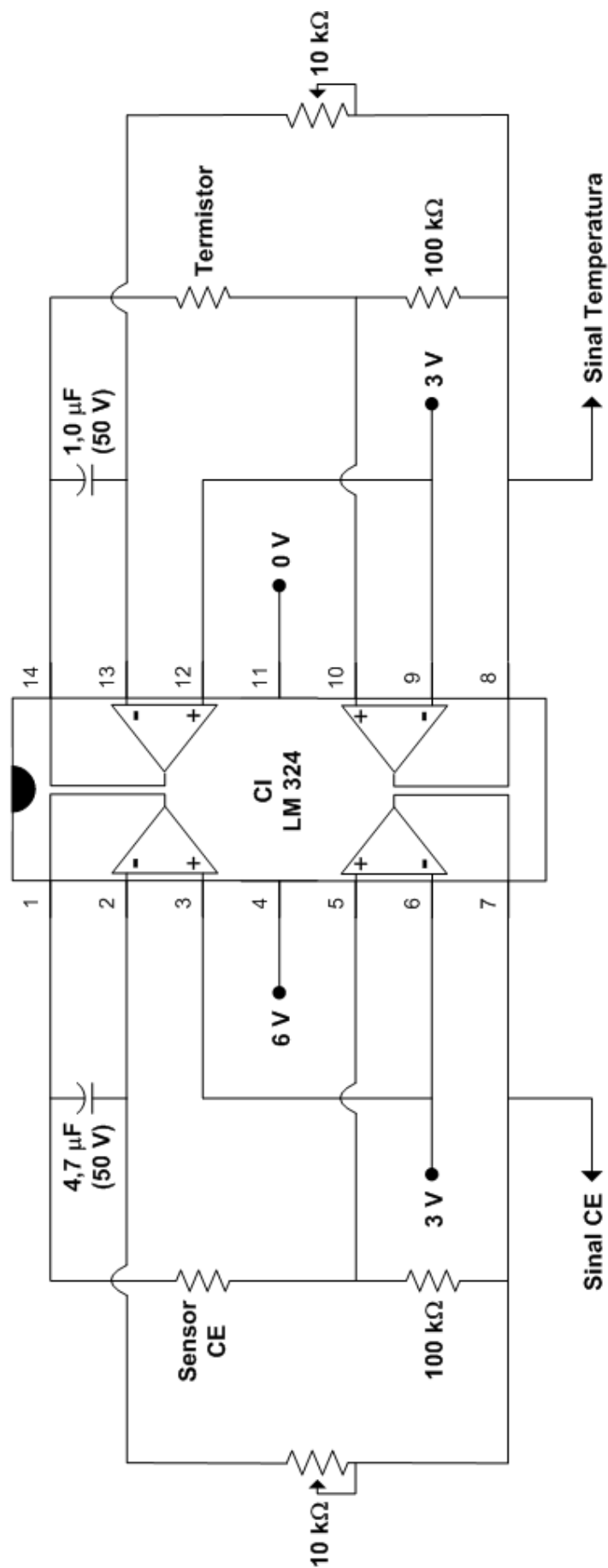


Figura 5.2. Diagrama eletrônico dos circuitos de condutividade elétrica e de temperatura (patente depositada sob o número PI 0502492-7).

O custo total dos circuitos, considerando-se os componentes eletrônicos, exceto a fonte de alimentação e a célula de condutividade, foi de R\$ 7,00, aproximadamente. Este valor, obviamente, não inclui os custos referentes aos trabalhos de laboratório, equipamentos necessários à calibração e validação, desenvolvimento do programa computacional capaz de gerenciar a aquisição de dados, nem a remuneração dos pesquisadores.

### 5.1.1. Calibração dos circuitos eletrônicos de condutividade elétrica e de temperatura

Os gráficos com as equações de regressão que relacionam frequência e resistência, correspondentes ao circuito eletrônico de condutividade, são apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4 para as faixas de condutividade elétrica de 0,10 a 2,15 dS m<sup>-1</sup> e 2,15 a 10,15 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente. Na Figura 5.5 são mostrados os resultados da mesma relação, porém, para o circuito de temperatura.

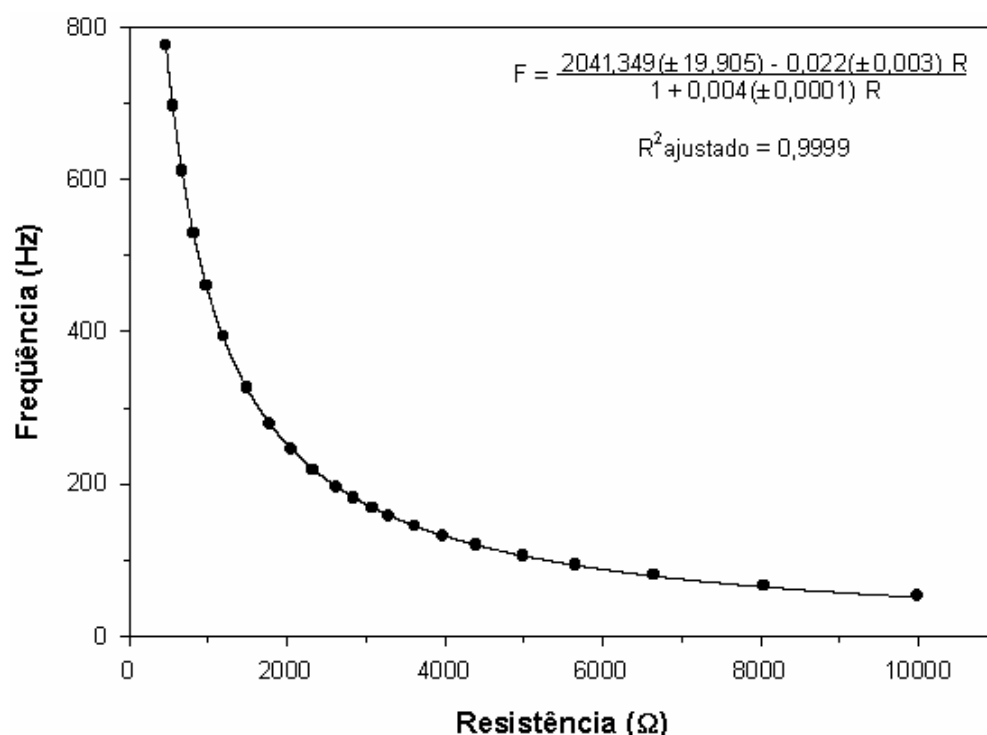


Figura 5.3. Frequência (F) de oscilação da tensão elétrica em relação à variação da resistência (R), para aplicação em medições de condutividade elétrica entre 0,10 e 2,15 dS m<sup>-1</sup>.

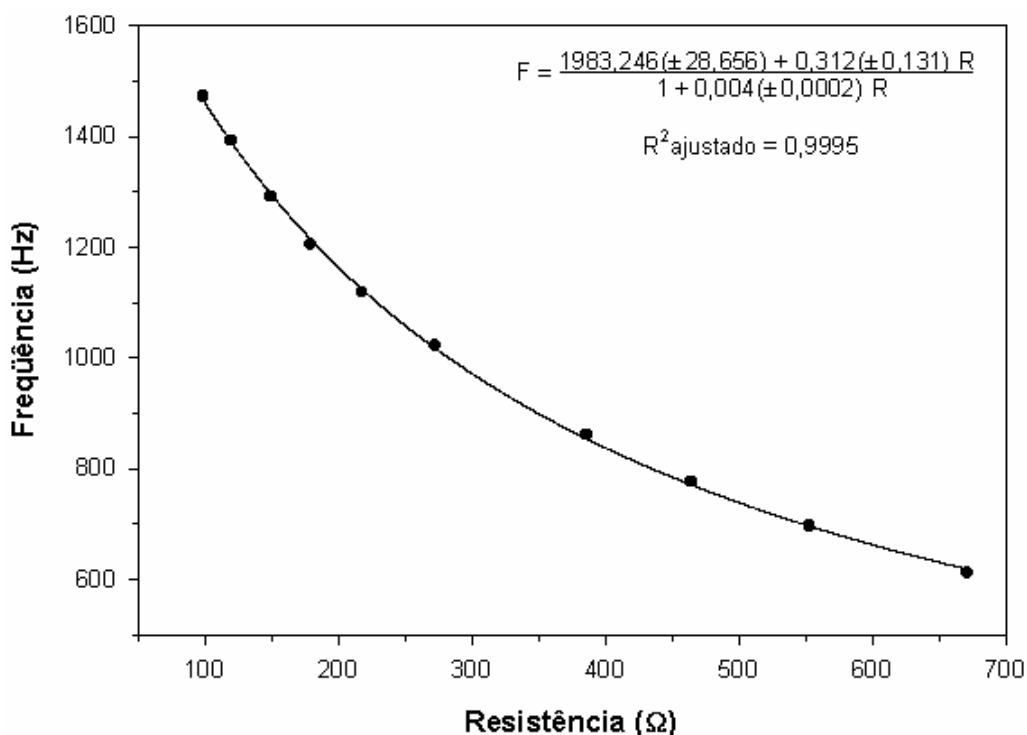


Figura 5.4. Frequência (F) de oscilação da tensão elétrica em relação à variação da resistência (R), para aplicação em medições de condutividade elétrica entre 2,15 e 10,15 dS m<sup>-1</sup>.

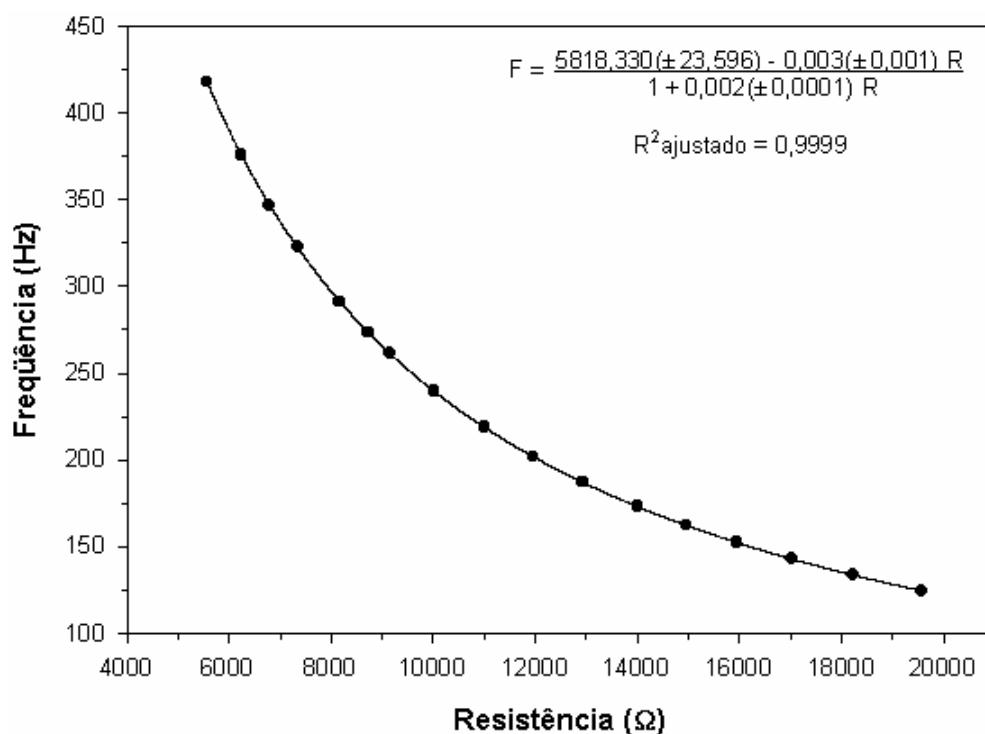


Figura 5.5. Frequência (F) de oscilação da tensão elétrica em relação à variação da resistência (R), para aplicação em medições de temperatura entre 283,16 e 313,16 K (10 e 40 °C).

Observando-se as Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, verifica-se que a frequência decresce exponencialmente com o aumento da resistência. Nas Figuras 5.3 e 5.4, como a condutividade elétrica é inversamente proporcional à resistência, valores altos de frequência implicam em condutividades elétricas elevadas e vice-versa.

A Figura 5.6 apresenta os resultados correspondentes à regressão entre os valores de resistência e temperatura, obtidos a partir da calibração do circuito eletrônico de temperatura.

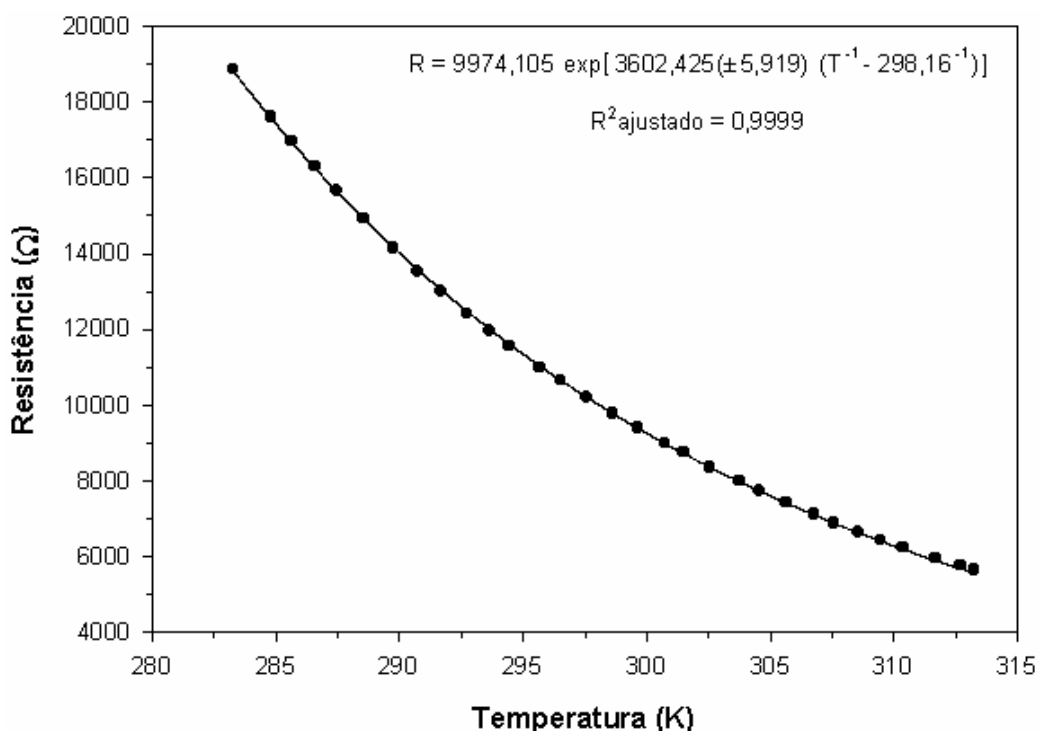


Figura 5.6. Efeito da temperatura (T) na resistência (R), com base em medições obtidas por meio do termistor incluído na célula de condutividade elétrica.

Conforme mostrado na Figura 5.6, na medida em que a temperatura aumenta, os valores de resistência elétrica tornam-se menores seguindo o mesmo comportamento dos gráficos anteriores. Este comportamento já era esperado, visto que o termistor da célula de condutividade possui coeficiente de temperatura negativo (NTC). O valor do parâmetro  $\beta$  na equação que relaciona resistência e temperatura depende do material que constitui o termistor. Na equação apresentada na Figura 5.6, o valor de  $\beta$  igual a 3.602,43 K, está próximo do mencionado por WANG e FELTON (1983) que é de, aproximadamente, 4000 K para os termistores mais comuns.

Relacionando as Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, é possível comprovar graficamente que a condutividade elétrica aumenta com o acréscimo de temperatura.

O gráfico apresentando os dados experimentais de condutividade elétrica (pontos) juntamente com os estimados pela equação de regressão múltipla (retas) é mostrado na Figura 5.7.

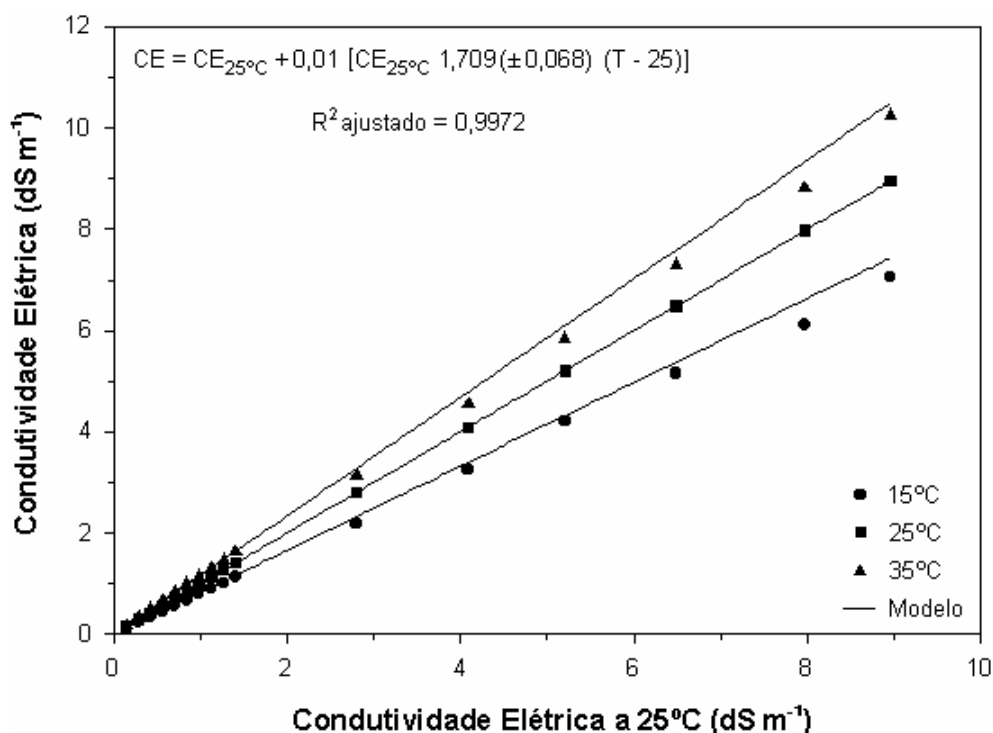


Figura 5.7. Efeito da temperatura na condutividade elétrica de soluções aquosas de cloreto de potássio, tendo como referência o valor de  $25^\circ\text{C}$ .

O coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ), mostrado na equação da Figura 5.7, aproximou-se do valor  $1,9\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  citado por Wissenschaftlich Technische Werkstätten (WTW, 2002) para soluções de cloreto de potássio com concentração de  $0,01 \text{ M}$  à temperatura de referência ( $25^\circ\text{C}$ ). De acordo com ZOLNIER (2004), a maioria dos condutímetro compensa o efeito da temperatura considerando a variação de  $2\%$  na condutividade elétrica para cada grau Celsius na temperatura da solução.

Os coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{\text{ajustados}}$ ), obtidos em todas as regressões realizadas (Figuras 5.3 a 5.7), variaram de  $0,9972$  a  $0,9999$ , demonstrando excelentes correlações entre as variáveis. Os elevados coeficientes de determinação associados às equações de calibração utilizadas

pelo HidroControle na conversão das frequências em valores de condutividade elétrica e temperatura, justificam a alta exatidão e precisão das medidas realizadas por meio dos circuitos eletrônicos.

Além dos circuitos eletrônicos, todas as equações de calibração foram patenteadas junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob o número PI 0502492-7.

### 5.1.2. Validação dos circuitos eletrônicos de temperatura e de condutividade elétrica

Os resultados da validação do circuito eletrônico de temperatura são apresentados graficamente na Figura 5.8.

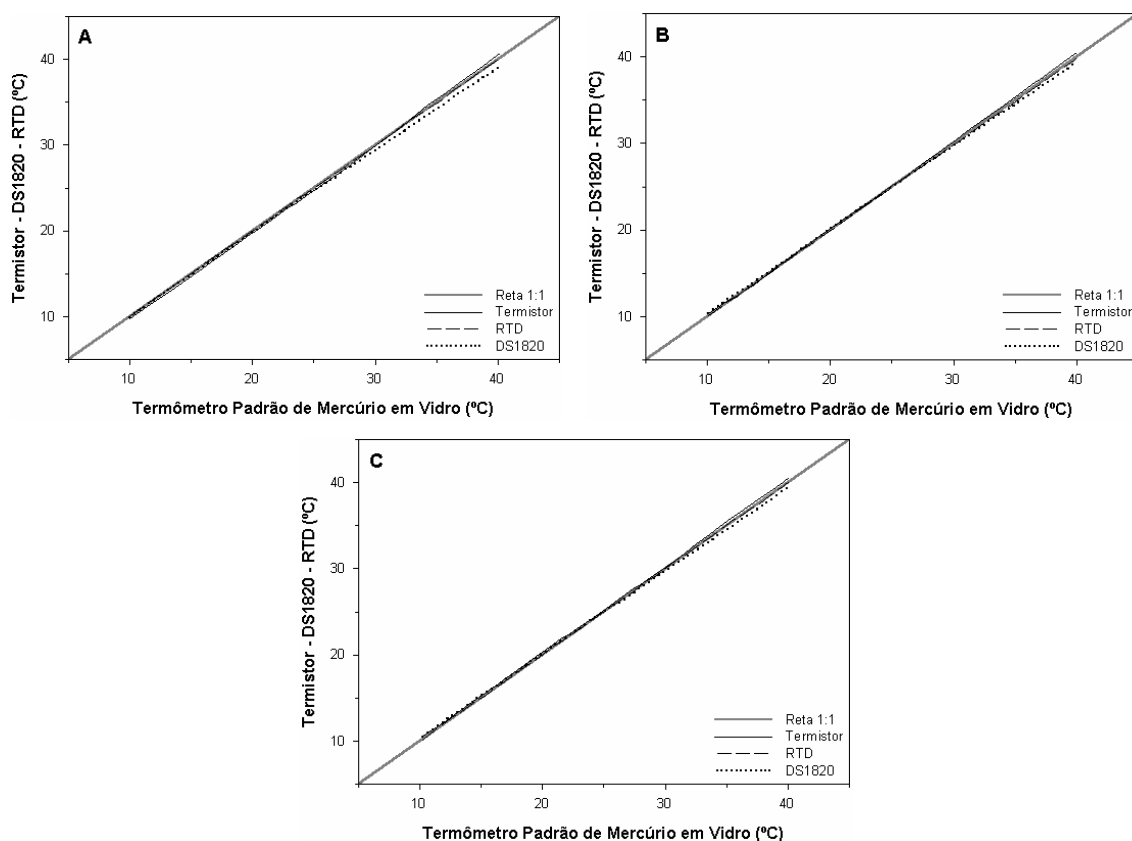


Figura 5.8. Relação entre as temperaturas medidas pelo termômetro padrão e os valores obtidos por meio do termistor, sensor DS1820 e RTD, considerando-se três conjuntos distintos de sensores (A, B e C).

Embora a calibração e a validação do circuito eletrônico de temperatura tenham sido conduzidas considerando-se a faixa de 10 a 40 °C, este sistema

de aquisição de dados pode ser calibrado e validado para uma faixa de temperatura mais ampla, conforme as necessidades do usuário.

A Tabela 5.1 apresenta os desvios dos sensores de temperatura (termistor, DS1820 e RTD) em relação ao termômetro padrão de mercúrio em vidro.

Tabela 5.1. Erro Absoluto Médio (EAM) e índice de Concordância de Willmott (CW) dos sensores de temperatura com base no termômetro padrão.

Conjunto de Sensores		Termistor	DS1820	RTD
A	EAM (°C)	0,26	0,47	0,04
	CW	0,9991	0,9963	0,9999
B	EAM (°C)	0,12	0,28	0,10
	CW	0,9997	0,9986	0,9998
C	EAM (°C)	0,19	0,30	0,05
	CW	0,9994	0,9985	0,9999
Valores Médios	EAM (°C)	0,19	0,35	0,06
	CW	0,9994	0,9978	0,9999

Quanto menor for o erro absoluto médio (EAM), menor será o desvio do sensor em relação ao padrão. Para a concordância de Willmott (CW), quanto mais próximo for este índice de 1 (um), melhor será a exatidão do sensor de temperatura. Assim sendo, de acordo com a Tabela 5.1, o sensor que apresentou o menor desvio em relação ao termômetro padrão foi o RTD, seguido do termistor e do DS1820. Apesar dos desvios nos valores de temperatura, obtidos com o circuito proposto (termistor), terem sido um pouco maiores que os do sensor de platina (RTD), estes foram inferiores aos desvios apresentados pelo DS1820.

Com base nestes resultados e no fato de que o termistor possui o menor custo em relação ao RTD e ao DS1820, pode-se afirmar que o sensor utilizado no circuito eletrônico é o mais adequado para monitorar a temperatura em aplicações agrícolas na faixa de 10 a 40 °C.

A validação do circuito eletrônico de condutividade elétrica, realizada por comparação das medições de condutividade de soluções eletrolíticas com os

correspondentes valores ôhmicos verdadeiros de resistores, resultou em diferenças inferiores a 1%.

Em função da influência significativa do campo eletromagnético do equipamento de banho termostatizado sobre os valores de frequência medidos, STEIDLE NETO et al. (2005) recomendam que os circuitos de medição de condutividade e temperatura permaneçam afastados de, no mínimo, 1,5 a 2,0 m de fontes geradoras deste campo (motores elétricos, reatores de lâmpadas fluorescentes, dentre outras).

## **5.2. Sistema automático (computadorizado) para preparo e aplicação de soluções nutritivas**

### **5.2.1. Programa computacional**

O programa computacional para o controle de preparo e aplicação de soluções nutritivas (HidroControle) foi responsável pela aquisição de dados micrometeorológicos internos e externos à casa de vegetação, medidas de condutividade elétrica e de temperatura da solução nutritiva drenada em ambos os sistemas (automático e convencional), detecção do nível de solução nutritiva no reservatório de preparo, controle das bombas de injeção de água e de soluções-estoque concentradas A e B para o preparo de solução nutritiva e controle da bomba de fertirrigação para a aplicação da solução preparada com frequência estabelecida com base na estimativa da transpiração da cultura do tomateiro.

Na tela do HidroControle, apresentada na Figura 5.9, o usuário pode acompanhar visualmente em tempo real os valores de todas as variáveis micrometeorológicas monitoradas e de condutividade elétrica das soluções nutritivas drenadas. Adicionalmente, é possível visualizar a estimativa da transpiração ( $\text{ml planta}^{-1} \text{min}^{-1}$ ) e o acúmulo desta ao longo do tempo. O coeficiente da cultura ( $K_c$ ), estimado a partir dos graus-dia acumulados em base diária, também é mostrado nesta tela.

O código fonte do HidroControle, implementado em linguagem C++, utilizando-se a plataforma de programação C++ *Builder* versão 5, pode ser consultado na íntegra no Apêndice.

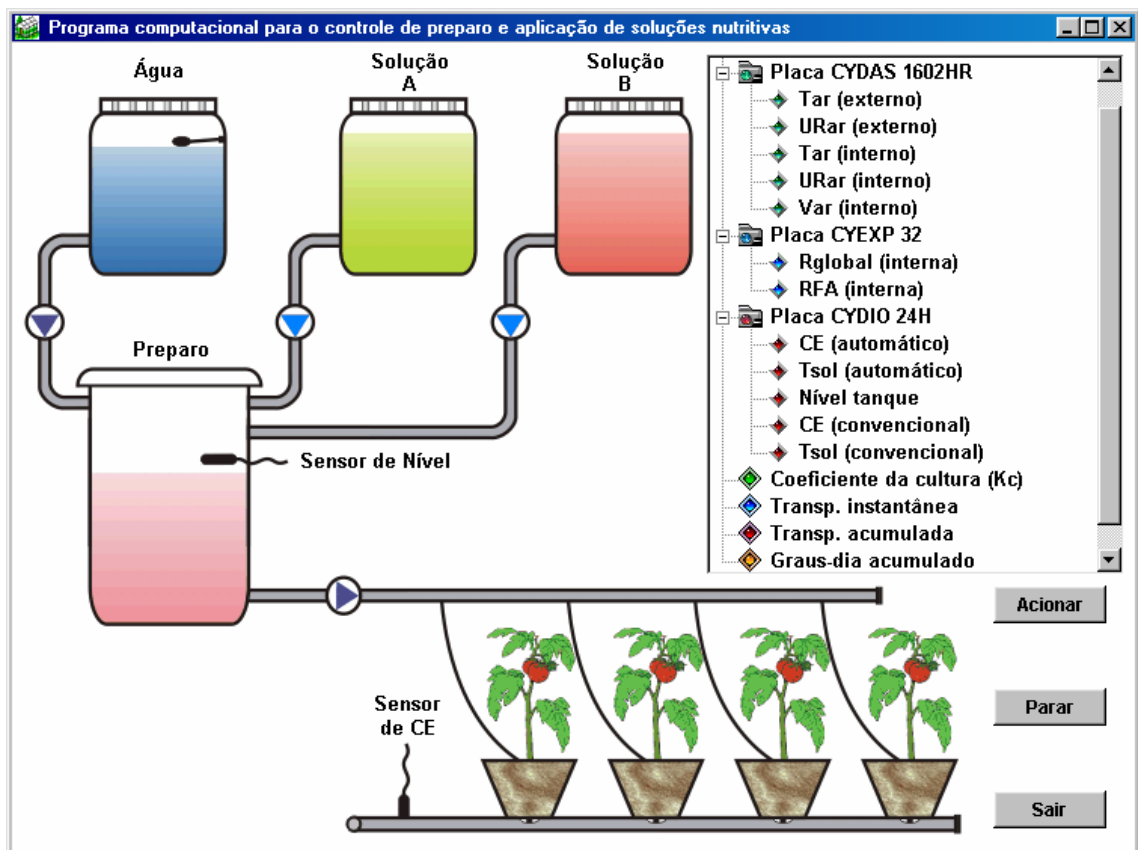


Figura 5.9. Tela do HidroControle desenvolvido em C++ Builder.

Nos momentos do preparo e da aplicação de solução nutritiva para as plantas, os símbolos que representam as bombas (setas) na tela do HidroControle piscam intermitentemente mostrando ao usuário a bomba que está acionada naquele instante.

### 5.2.2. Capacidade de retenção de água e densidade aparente da areia

A Figura 5.10 apresenta a curva de retenção de água para o substrato de areia utilizado no cultivo do tomateiro. Como já era esperado, na medida em que a umidade diminui, a sucção necessária para retirar a água contida no substrato de areia aumenta, seguindo um comportamento exponencial decrescente, tendendo a estabilizar para valores de tensão matricial superiores a 3 kPa.

Comparativamente a solos mais estruturados, a capacidade de retenção de água da areia é extremamente reduzida. Por essa razão, a frequência de aplicação da solução nutritiva para as plantas foi muito elevada.

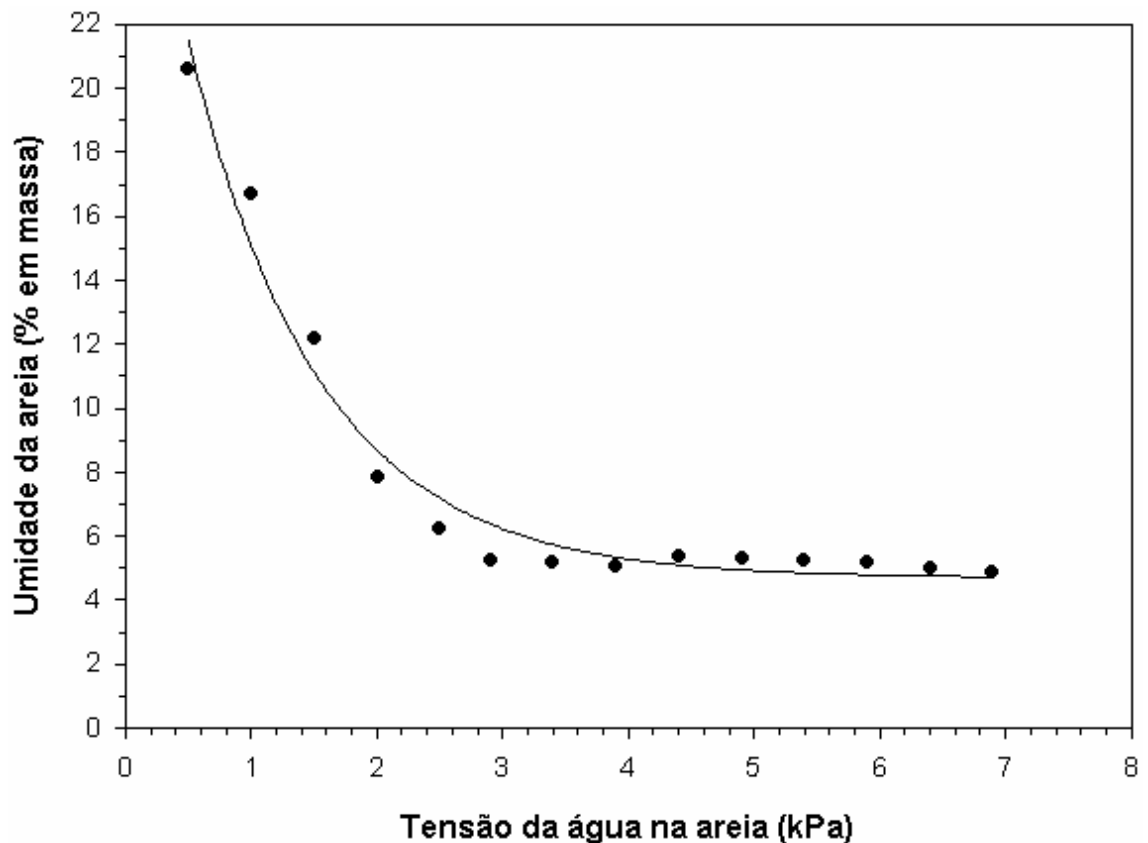


Figura 5.10. Curva de retenção de água para o substrato de areia com granulometria entre 1 e 3 mm.

A densidade aparente média da areia, determinada em laboratório a partir de três amostras, foi igual a  $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ .

Na altura média de 17 cm (tensão matricial = 1,7 kPa) em relação ao fundo do vaso de cultivo, posição na qual as raízes do tomateiro estariam concentradas em um volume de  $1.000 \text{ cm}^3$  de areia, a umidade aproximada, obtida com base no gráfico da Figura 5.10, foi de 10% (percentual em massa). Portanto, o volume de água necessário para saturar os  $1.000 \text{ cm}^3$  de areia com densidade aparente de  $1,36 \text{ g cm}^{-3}$  e na altura média de 17 cm foi igual a 136,4 ml ( $1.000 \text{ cm}^3 \times 1,36 \text{ g cm}^{-3} \times 10\%$ ). O conhecimento deste volume de saturação foi essencial na parametrização da estratégia de controle do sistema automático.

Estes resultados estão próximos dos determinados por ANDRIOLO et al. (2004) que, pesquisando a utilização do substrato de areia (granulometria entre 1 e 3 mm) no cultivo hidropônico da alface, obtiveram o valor médio de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  para a densidade aparente e o volume retido de 111,0 ml de água em  $1.000 \text{ cm}^3$  de areia.

### 5.2.3. Coeficientes da cultura do tomateiro

A curva de distribuição e a equação sigmoidal de estimativa dos coeficientes da cultura do tomateiro, com base nos graus-dia acumulados ( $GD_{acum}$ ) após o transplante das mudas, são mostradas na Figura 5.11. O gráfico e a equação de estimativa do  $K_c$  foram obtidos a partir de medições realizadas em experimento prévio, onde foram cultivadas, pela técnica da hidroponia e sob condições de casa de vegetação, plantas de tomate (híbrido Duradoro) em substrato de areia revestido na superfície com filme plástico transparente.

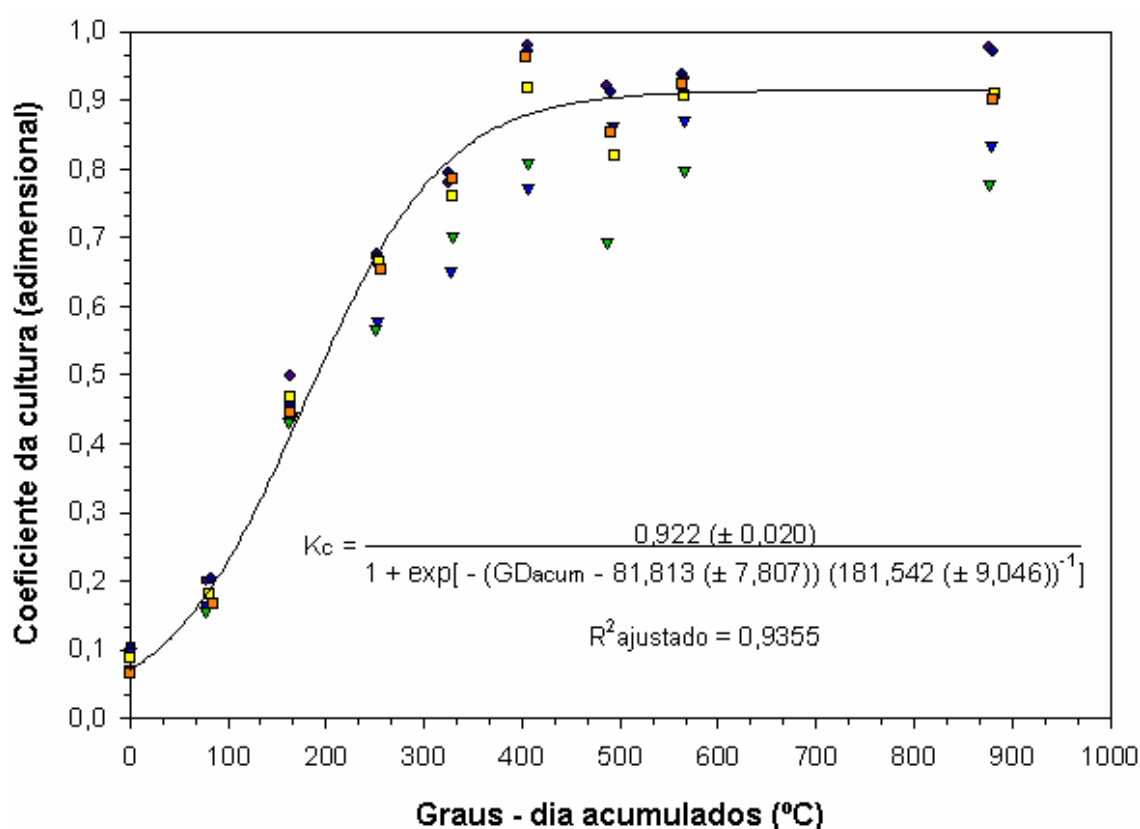


Figura 5.11. Curva de ajuste e equação de estimativa dos coeficientes da cultura do tomateiro.

Os coeficientes da cultura do tomateiro, estimados pela equação apresentada na Figura 5.11, estão em concordância com os valores mencionados por SIMONNE (2005) para cultivo de tomateiros em casa de vegetação, os quais variaram de 0,2 para o estágio inicial a 0,9 para o estágio intermediário de desenvolvimento.

### 5.3. Simulação da evapotranspiração da cultura do tomateiro

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam a simulação da evapotranspiração ( $ET_c$ ), em função dos graus-dia acumulados ( $GD_{acum}$ ), durante todo o ciclo da cultura do tomateiro. Nesta simulação foram considerados valores típicos do balanço de radiação ( $R_n$ ) e do déficit de pressão do vapor d'água ( $DPV_{ar}$ ), representativos do início da manhã, meio-dia e final da tarde. O comportamento mostrado nestas figuras assemelha-se ao da curva do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) do tomateiro (Figura 5.11).

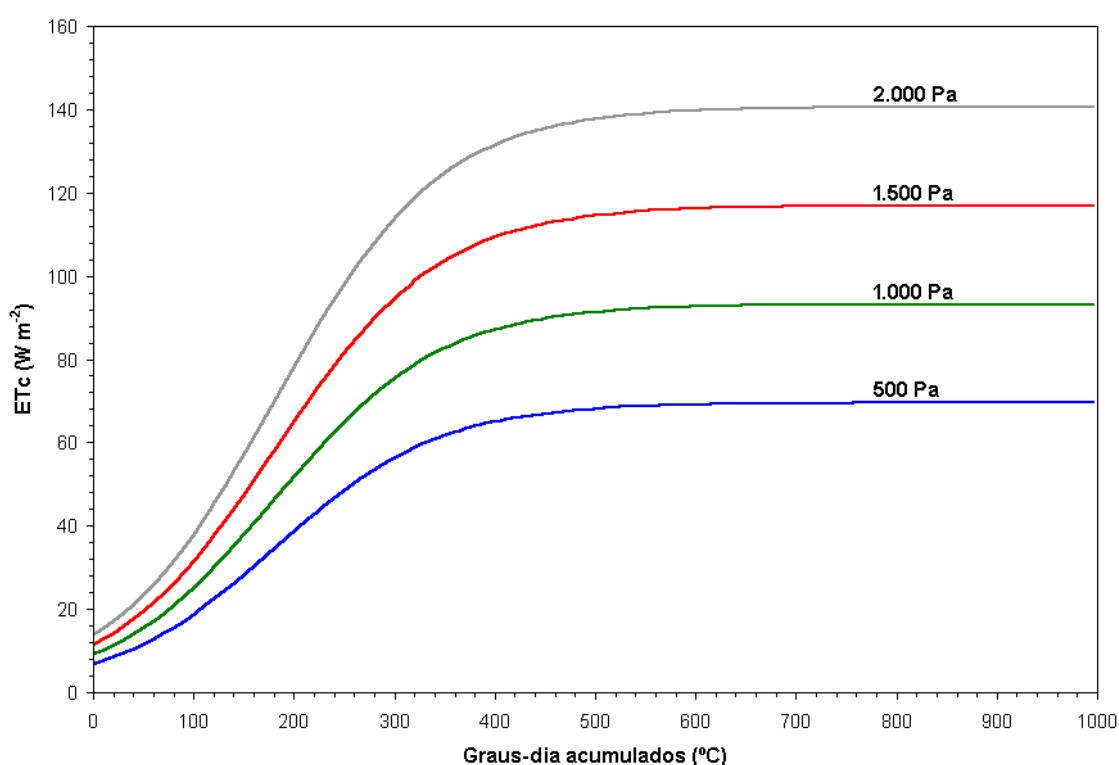


Figura 5.12. Simulação da evapotranspiração da cultura do tomateiro, em função dos graus-dia acumulados, para diferentes níveis de  $DPV_{ar}$  (500, 1.000, 1.500 e 2.000 Pa) combinados com o valor constante de  $R_n$  ( $100 W m^{-2}$ ).

Os resultados da simulação mostraram que, a partir do início do crescimento das plantas de tomate, a evapotranspiração aumentou progressivamente com os graus-dia acumulados até aproximadamente 500  $GD_{acum}$ . Deste ponto em diante, os valores de evapotranspiração estabilizaram, mantendo-se assim até o final do ciclo da cultura.

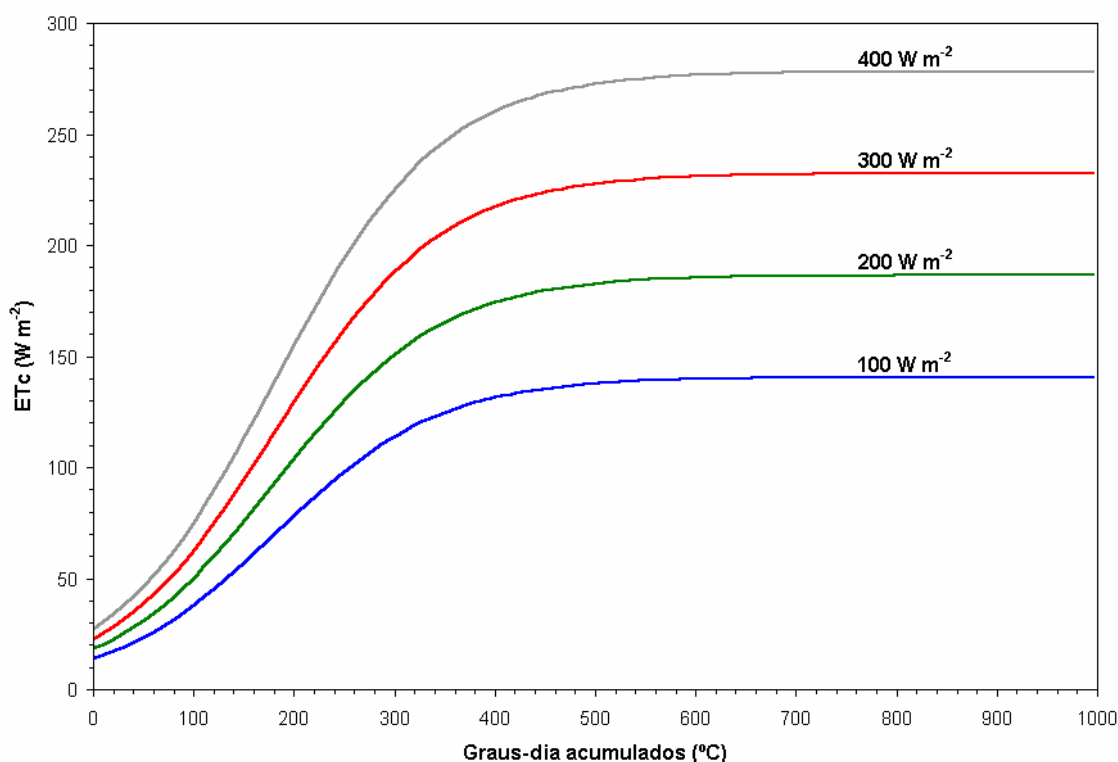


Figura 5.13. Simulação da evapotranspiração da cultura do tomateiro, em função dos graus-dia acumulados, para diferentes níveis de  $R_n$  (100, 200, 300 e 400  $W m^{-2}$ ) combinados com o valor constante de  $DPV_{ar}$  (2.000 Pa).

A simulação de  $ET_c$  para condições de  $DPV_{ar}$  constante em 2.000 Pa (Figura 5.13), mostrou que a evapotranspiração aumentou aproximadamente 10 vezes do início ao final do ciclo da cultura, quando o nível de  $DPV_{ar}$  mencionado foi combinado com  $R_n$  de 100, 200, 300 e 400  $W m^{-2}$ . Este resultado comprova a necessidade de um sistema de controle de fertirrigação, como o proposto neste trabalho, que considere as modificações na demanda hídrica da cultura em função das condições micrometeorológicas e dos estádios de desenvolvimento.

Adicionalmente, as Figuras 5.12 e 5.13 permitem analisar as alterações da  $ET_c$  em base diária. Pela Figura 5.12 observou-se que, para o nível de  $R_n$  de 100  $W m^{-2}$  e 400  $GD_{acum}$ , a evapotranspiração praticamente dobrou quando o  $DPV_{ar}$  mudou de 500 para 2.000 Pa. A partir de medições realizadas ao longo do período experimental, verificou-se que combinações de  $R_n = 100 W m^{-2}$  com  $DPV_{ar} = 500 Pa$  e  $R_n = 100 W m^{-2}$  com  $DPV_{ar} = 2.000 Pa$  são representativas do início da manhã e do final da tarde, respectivamente.

De maneira similar, a Figura 5.13 mostra o efeito do balanço de radiação na evapotranspiração quando o  $DPV_{ar}$  é mantido constante em 2.000 Pa. Para

400  $GD_{acum}$ , a  $ET_c$  diminuiu aproximadamente  $130 \text{ W m}^{-2}$  quando o  $R_n$  foi modificado de 400 para  $100 \text{ W m}^{-2}$ , o que caracteriza alteração na demanda de água do início para o final da tarde, respectivamente.

#### 5.4. Medição de transpiração da cultura do tomateiro

A Figura 5.14 apresenta os valores estimados de transpiração, obtidos pela somatória diária das estimativas, e os valores medidos de transpiração referentes às repetições dos sistemas automático e convencional, no período das 8:00 às 18:00 horas.

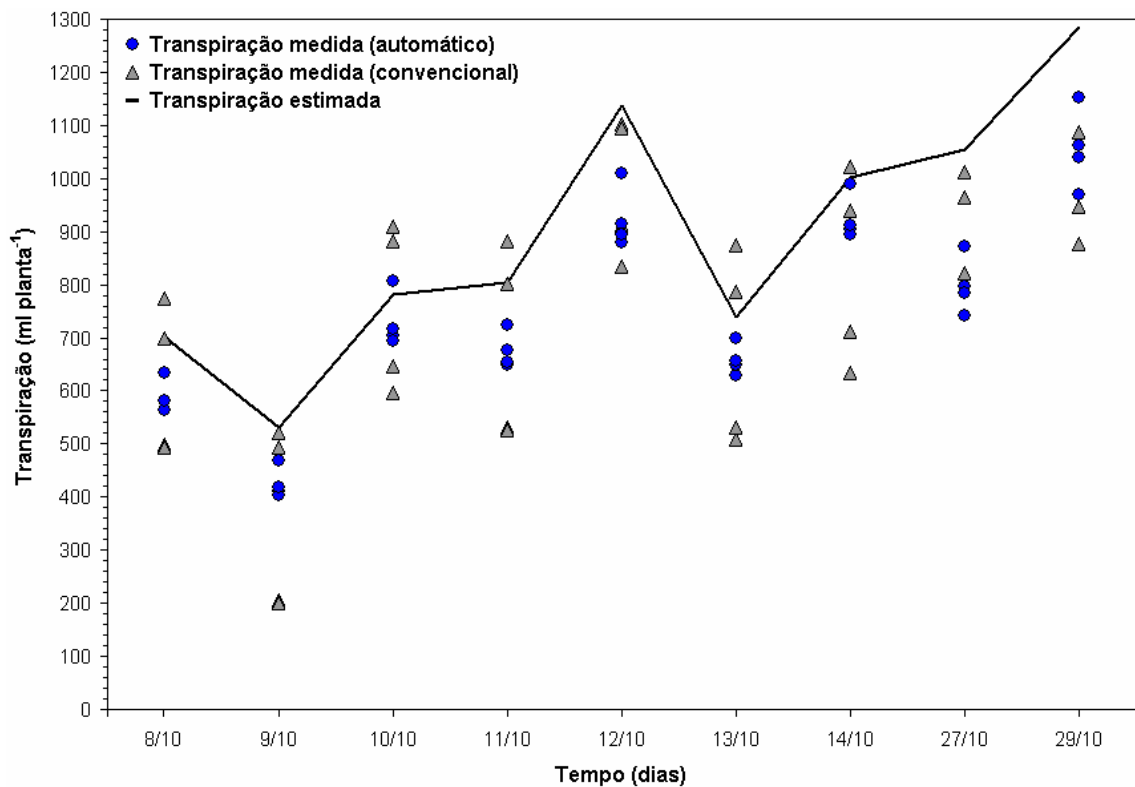


Figura 5.14. Valores de transpiração estimados pelo modelo de Penman-Monteith e valores medidos de transpiração referentes às quatro repetições de cada tratamento, para um período de nove dias.

Os resultados demonstraram que o modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith, padronizado pela FAO e modificado a fim de propiciar estimativas mais coerentes sob condições de casa de vegetação, possibilitou a predição dos valores de transpiração da cultura do tomateiro com precisão e exatidão adequadas ao controle das frequências das fertirrigações do sistema

automático, superestimando sutilmente os valores observados nos dias em que as medições foram realizadas.

As curvas de distribuição da radiação solar global ( $R_g$ ), da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e do déficit de pressão do vapor d'água no ar interno ( $DPV_{ar}$ ), geradas a partir de medições realizadas no horário das 8:00 às 18:00 horas para os dias nos quais a transpiração foi medida, são mostradas na Figura 5.15. Nesta mesma figura, juntamente com as curvas de  $R_g$  e RFA, são fornecidos os respectivos valores totais de radiação obtidos por meio da integração dos dados ao longo de cada dia no período das 8:00 às 18:00 horas.

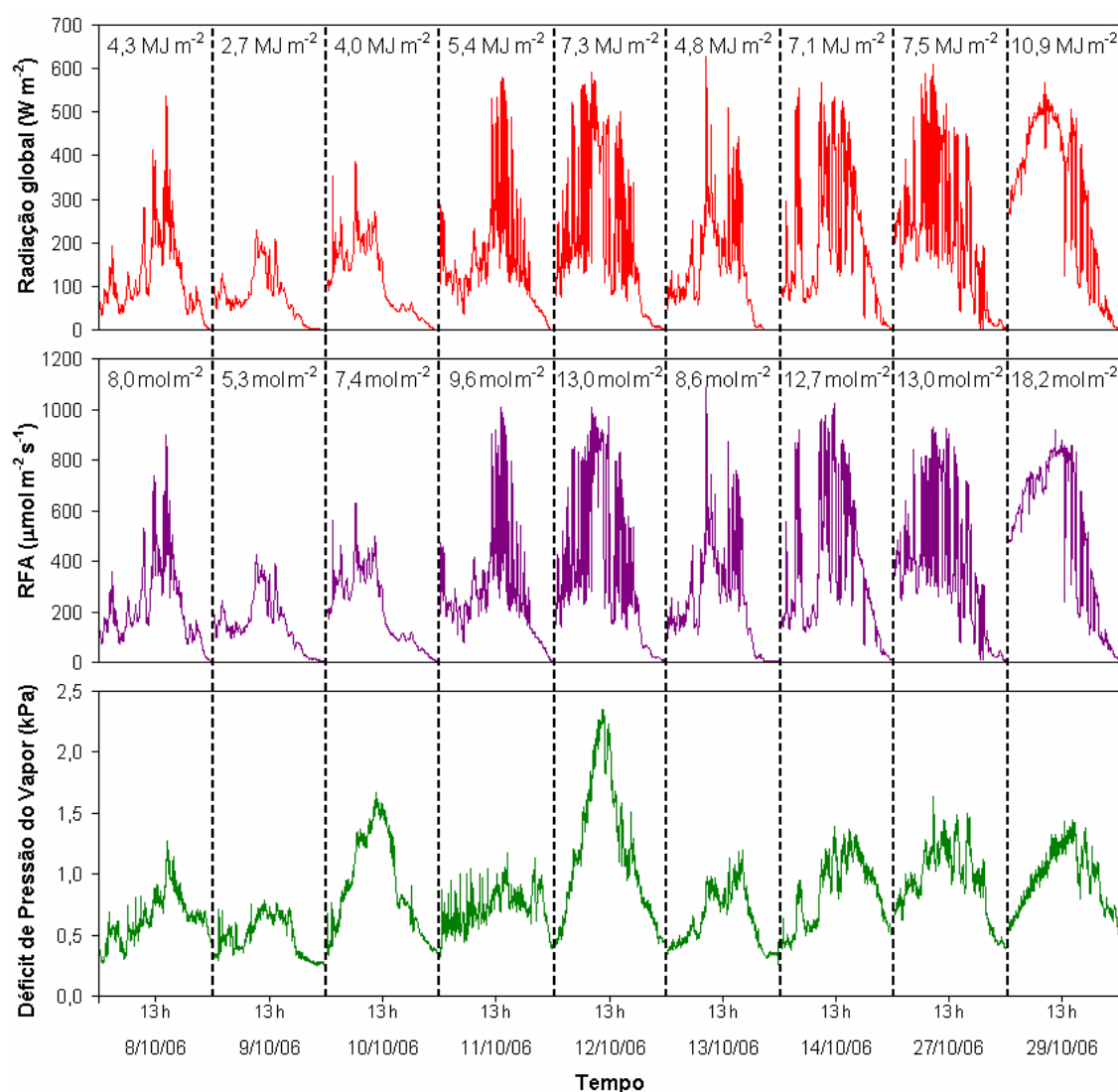


Figura 5.15. Curvas de distribuição da radiação solar global, da radiação fotossinteticamente ativa e do déficit de pressão do vapor d'água no ar interno referentes aos dias de medição da transpiração, no horário das 8:00 às 18:00 horas.

Dentre as prováveis causas que podem ter contribuído para as diferenças entre os valores medidos e estimados de transpiração (Figura 5.14), ressalta-se a contabilização parcial ou a não contabilização do volume drenado associado a um evento de fertirrigação ocorrido poucos minutos/segundos antes do término do horário de coleta, visto que o tempo efetivo para a drenagem de cada fertirrigação era da ordem de minutos. Por outro lado, as diferenças constatadas podem estar relacionadas a algumas considerações e/ou estimativas realizadas por equações empíricas empregadas no cálculo da transpiração da cultura do tomateiro.

As variações diárias ocorridas nos valores de  $R_g$ , RFA e  $DPV_{ar}$  justificam as oscilações observadas nos valores medidos e estimados de transpiração da Figura 5.14. Assim sendo, no dia 09/10/2006, a baixa capacidade do ar interno à casa de vegetação em incorporar vapor d'água (representada pelo  $DPV_{ar}$ ), associado a reduzidos níveis de radiação solar global, resultou nos menores valores observados e estimado de transpiração. Contrariamente, no dia 29/10/2006, onde a radiação solar global integrada atingiu  $10,9 \text{ MJ m}^{-2}$ , o valor estimado de transpiração foi o maior de todo o período analisado. De acordo com MOESEL (1987), no interior de casas de vegetação, onde as velocidades do ar são tipicamente baixas e mudanças rápidas na temperatura do ar ocorrem raramente, a radiação solar global é a variável micrometeorológica mais importante que contribui para o processo de evapotranspiração.

Apesar da diferença no valor total de radiação solar global entre os dias 12/10/2006 e 14/10/2006 ser pouco significativa ( $200 \text{ kJ m}^{-2}$ ), o maior valor estimado de transpiração, ocorrido no dia 12/10/2006, pode ser atribuído ao elevado déficit de pressão do vapor d'água, que alcançou  $2,35 \text{ kPa}$  próximo ao meio dia (Figura 5.15).

## **5.5. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes às fertirrigações e drenagens**

### **5.5.1. Lixiviação e condutividade elétrica das soluções drenadas**

Na Figura 5.16 são apresentadas as oscilações nos valores das frações lixiviadas que ocorreram durante sete dias consecutivos (08/10/2006 a 14/10/2006), compreendidos no período de medição da transpiração, no

horário das 8:00 às 18:00 horas, nos sistemas automático e convencional. Nesta mesma figura, são mostradas as variações na condutividade elétrica das soluções drenadas que acumularam nos baldes de coleta em ambos os sistemas.

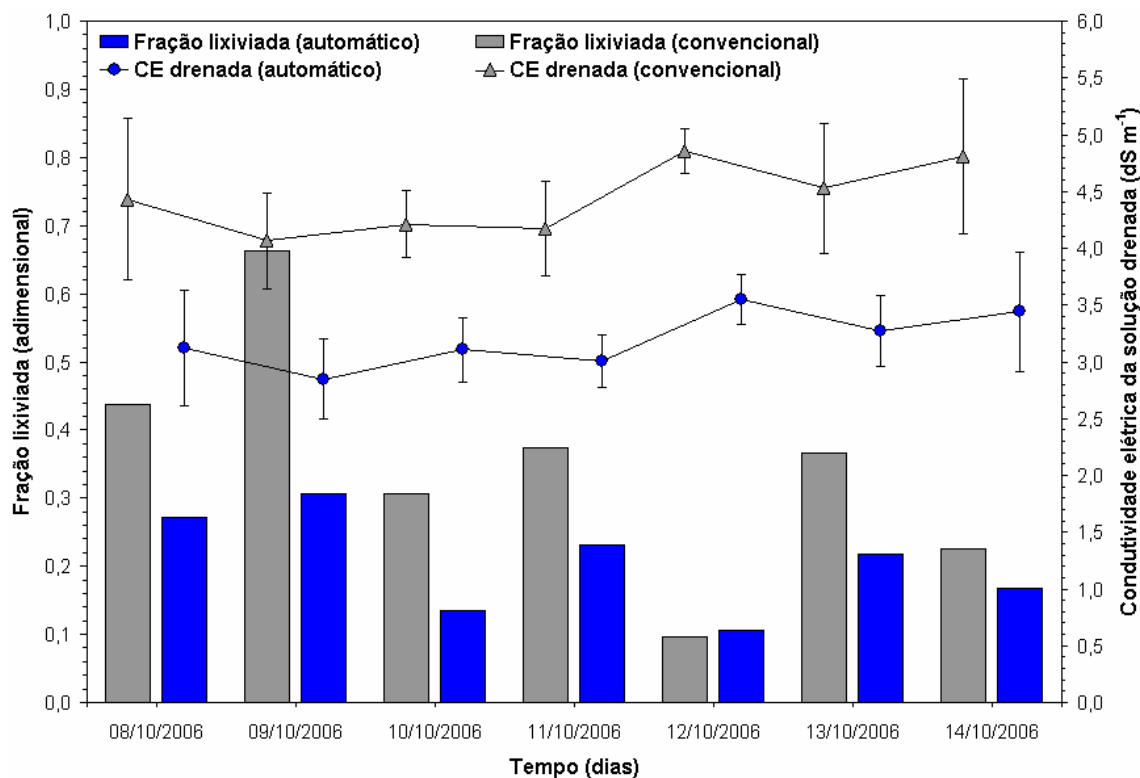


Figura 5.16. Variações na fração lixiviada e na condutividade elétrica da solução drenada, associadas aos sistemas automático e convencional, no decorrer de sete dias consecutivos.

Constata-se pela Figura 5.16 uma relação inversamente proporcional entre a fração lixiviada e a condutividade elétrica da solução drenada. No dia 09/10/2006, a radiação solar global, integrada das 8:00 às 18:00 horas, resultou no menor valor observado ( $2,7 \text{ MJ m}^{-2}$ ) dentre os dias analisados (Figura 5.15). Consequentemente, as transpirações estimada e medida apresentaram a mesma tendência (Figura 5.14). Em razão da baixa transpiração da cultura neste dia, as frações lixiviadas, principalmente a associada ao sistema convencional, foram elevadas e promoveram decréscimos nos valores de condutividade elétrica das soluções drenadas (Figura 5.16). Em contraste, no dia 12/10/2006, verificou-se altos valores de transpiração (Figura 5.14) devido aos acréscimos nos níveis de radiação solar global e de déficit de pressão do vapor d'água (Figura 5.15). Esta combinação

de variáveis, ocasionou reduções nas frações lixiviadas e elevação nos valores de condutividade elétrica das soluções drenadas nos vasos dos sistemas automático e convencional (Figura 5.16).

Em termos médios, a fração lixiviada referente ao sistema automático foi de 0,21, comprovando o que havia sido preestabelecido na estratégia de controle do sistema automático para o tempo de acionamento da bomba de fertirrigação, que deveria suprir o déficit hídrico das plantas e permitir drenagem de 20% do volume de solução nutritiva aplicada. Apesar da fração lixiviada média ter sido igual a 0,38 para o sistema convencional, no dia 09/10/2006 foi atingido o valor de 0,67, que corresponde a drenagem de 67% de solução nutritiva em relação aos 100% fertirrigados, evidenciando um desperdício excessivo.

Em relação à condutividade elétrica das soluções drenadas nos vasos do sistema automático, é possível confirmar, com base na Figura 5.16, a eficiência da estratégia de controle, mantendo as concentrações do efluente em torno dos 3 dS m<sup>-1</sup>.

De acordo com RICHARDS (1954), citado por KU e HERSHEY (1991), o maior benefício da lixiviação em detrimento do aspecto ambiental é a remoção do excesso de fertilizantes e a minimização do processo de salinização na zona radicular das plantas. Entretanto, devido à salinização progressiva do substrato nos vasos do sistema convencional, ocorrida no período anterior ao analisado, a condutividade elétrica das soluções drenadas manteve-se alta (média de 4,6 dS m<sup>-1</sup>), mesmo com frações lixiviadas elevadas.

### **5.5.2. Influência das estratégias de controle e das variáveis micrometeorológicas sobre a condutividade elétrica dos efluentes**

Ao longo do período experimental de cultivo hidropônico do tomateiro, a estratégia de controle do sistema automático foi ajustada com a finalidade de tornar o controle da condutividade elétrica mais eficiente.

Na Figura 5.17 são mostradas as variações ocorridas na condutividade elétrica das soluções nutritivas drenadas nos sistemas automático e convencional para o período de 27/10/2006 a 01/11/2006. Adicionalmente, a Figura 5.17 apresenta a marcha diária de transpiração estimada ao longo deste

mesmo período e o número diário de fertirrigações realizadas pelos sistemas automático e convencional.

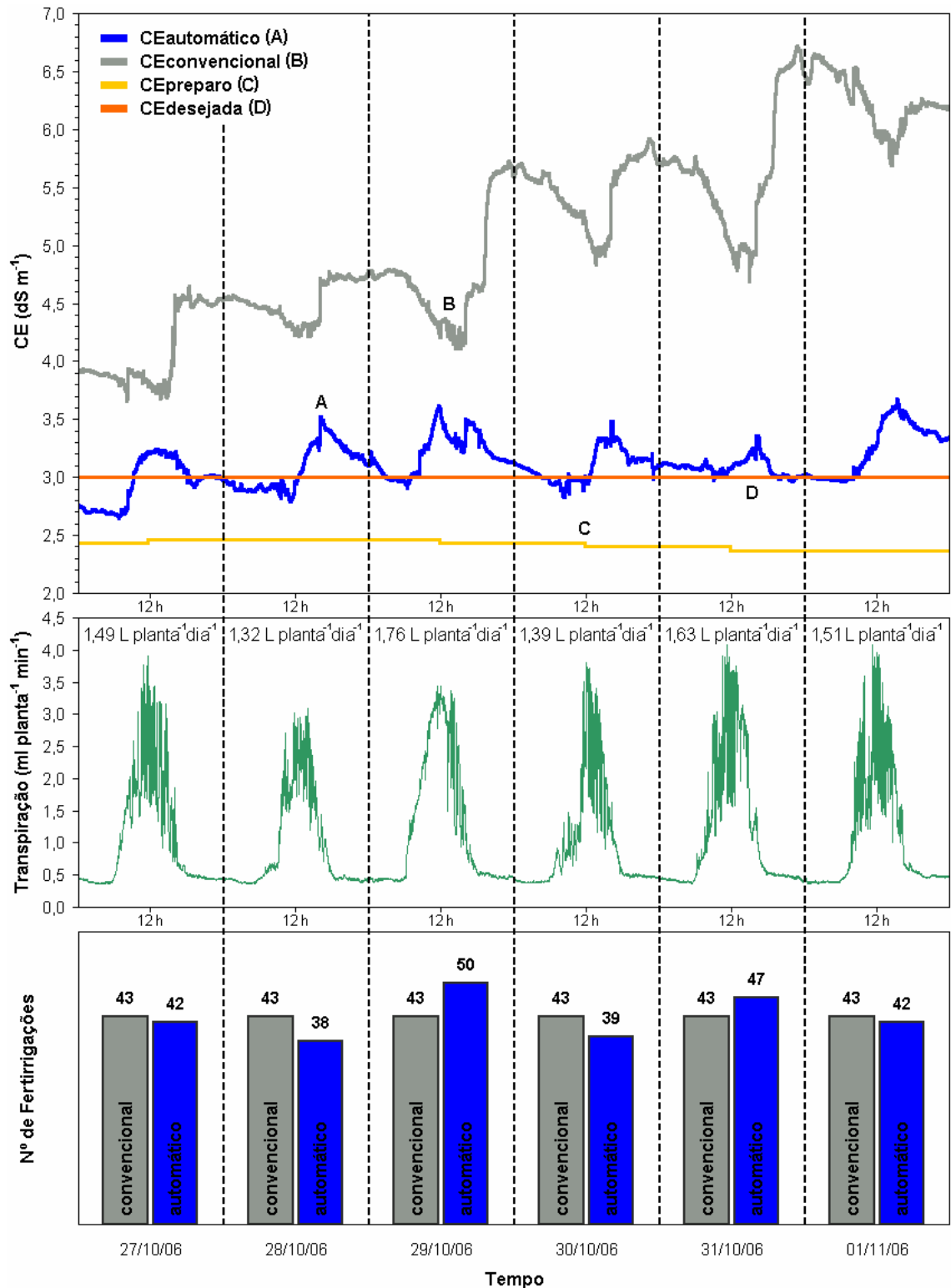


Figura 5.17. Variações diárias de condutividade elétrica das soluções drenadas (sistemas automático e convencional), de transpiração estimada e no número de fertirrigações durante seis dias.

Conforme se constata na Figura 5.17, o sistema automático mostrou-se eficiente no controle da condutividade elétrica da solução nutritiva drenada, minimizando as oscilações em relação ao valor desejado ( $3 \text{ dS m}^{-1}$ ). A eficiência deste controle está diretamente associada ao valor de condutividade elétrica corrigida ( $CE_{\text{corr}}$ ) calculado diariamente com base na condutividade elétrica média do dia anterior.

Em relação à condutividade elétrica da solução drenada no sistema convencional, verificou-se um acréscimo progressivo desta concentração ao longo dos seis dias analisados, atingindo valores acima de  $6,5 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 5.17). Esta tendência de acréscimo na concentração da solução drenada, no decorrer do período de crescimento, também foi evidenciada por ROUPHAEL et al. (2006) em abobrinha cultivada em substrato com solução nutritiva preparada a partir de água salina e não-salina. Este aumento na condutividade elétrica pode provocar a salinização do substrato em níveis prejudiciais às plantas.

Outro aspecto importante a ser ressaltado, refere-se aos decréscimos na condutividade elétrica da solução drenada no sistema convencional nos horários próximos ao meio dia. Estas reduções podem ser justificadas em função da frequência de fertirrigação do sistema convencional (temporizado) ter sido alta nestes horários (tipicamente mais quentes), visto que os valores diários de transpiração acumulada (Figura 5.17) não foram elevados. Assim sendo, os eventos de fertirrigação promoveram a “lavagem” do substrato de areia, contribuindo para o decréscimo nos valores medidos de condutividade elétrica da solução drenada.

As marchas diárias de radiação solar global (interna), de radiação fotossinteticamente ativa (interna) e do déficit de pressão do vapor d’água no ar (interno e externo), elaboradas com base em medições realizadas no período de 27/10/2006 a 01/11/2006, são apresentadas na Figura 5.18.

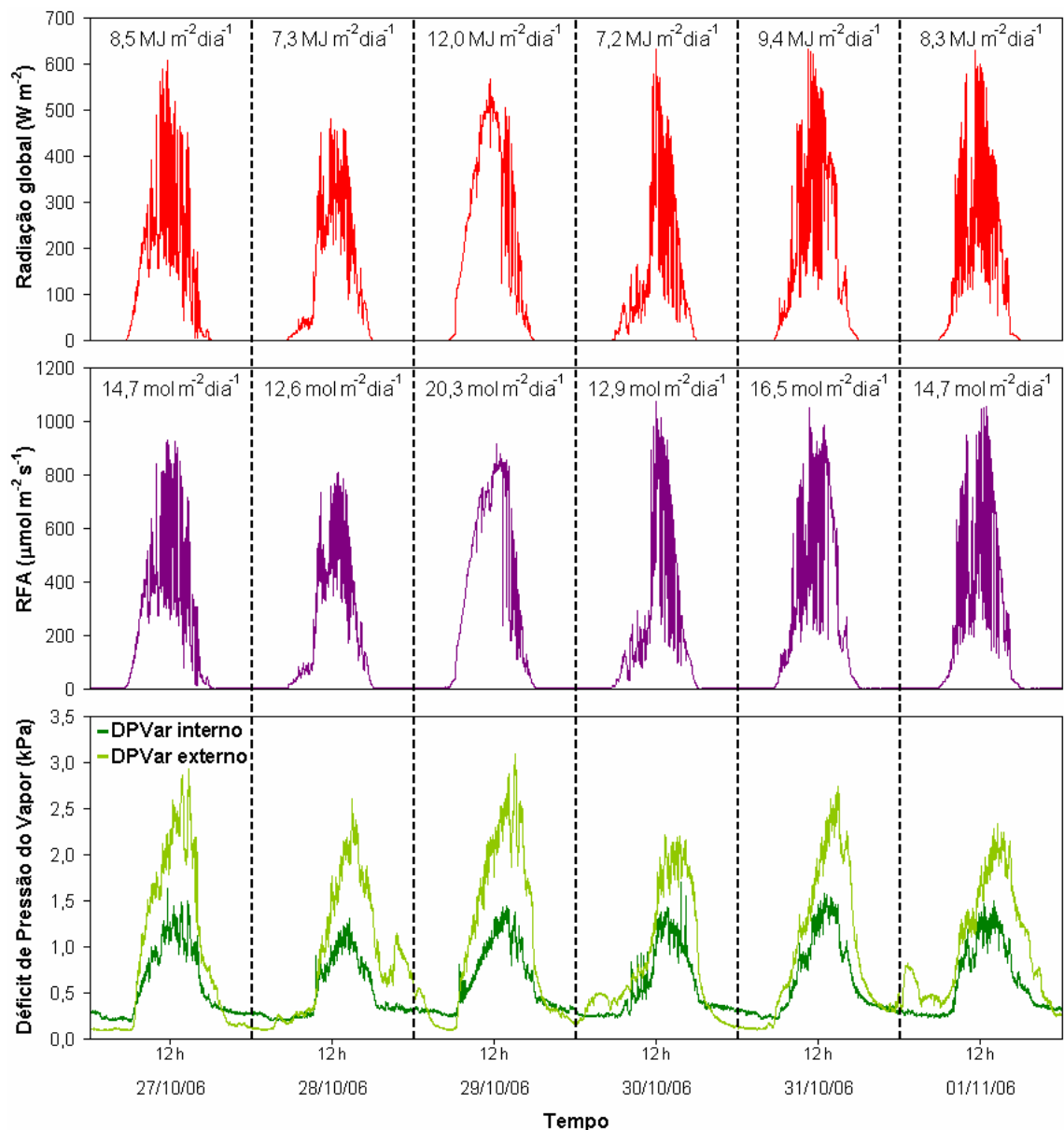


Figura 5.18. Curvas diárias de distribuição da radiação solar global, da radiação fotossinteticamente ativa e do déficit de pressão do vapor d'água no ar interno e externo à casa de vegetação, para o período de 27/10/2006 a 01/11/2006.

Analisando-se conjuntamente as Figuras 5.17 e 5.18, verificou-se que no dia 29/10/2006 a reduzida nebulosidade no período matutino, evidenciada pelas curvas de distribuição da radiação solar global e da radiação fotossinteticamente ativa para o referido dia, refletiu-se em um maior número de fertirrigações realizadas pelo sistema automático (sete eventos a mais que o sistema convencional). Contrariamente, no dia anterior (28/10/2006), caracterizado por reduzidas taxas de transpiração e baixos valores de radiação solar global, de radiação fotossinteticamente ativa e do déficit de pressão do vapor d'água no ar interno, em relação aos valores do dia 29/10/2006, o

número de fertirrigações realizadas pelo sistema automático foi inferior ao do convencional em cinco unidades. Com base nestas comparações, pôde-se inferir que o sistema automático modificou adequadamente a frequência de fertirrigações de acordo com as variáveis micrometeorológicas internas à casa de vegetação, representadas pelas estimativas de transpiração. Desta maneira, o sistema automático evitou a aplicação desnecessária e o conseqüente desperdício de solução nutritiva em horários nos quais a demanda hídrica da cultura era reduzida. Já o sistema convencional realizou, por exemplo, no dia 29/10/2006, um número de fertirrigações aquém do necessário (14% a menos). Apesar deste fato, a “lavagem” do substrato de areia, constatada neste dia, está relacionada à concentração do número de fertirrigações nos horários próximos ao meio dia, que promoveram redução na condutividade elétrica da solução nutritiva drenada de até  $0,7 \text{ dS m}^{-1}$ .

As curvas de distribuição de temperatura e de umidade relativa do ar, internas e externas à casa de vegetação, são mostradas na Figura 5.19.

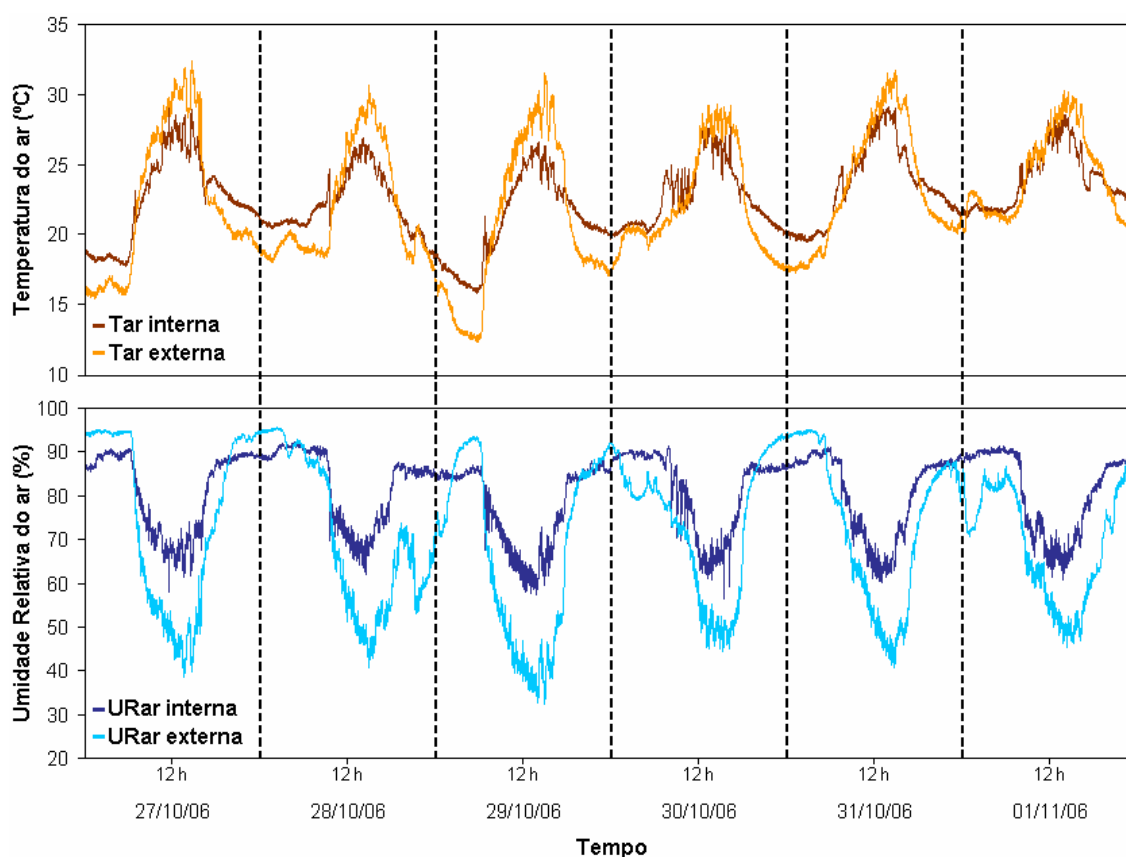


Figura 5.19. Curvas diárias de distribuição de temperatura e de umidade relativa do ar, internas e externas à casa de vegetação, para o período de 27/10/2006 a 01/11/2006.

Comparando-se as oscilações diárias de temperatura do ar interno e externo à casa de vegetação (Figura 5.19), verificou-se que os sistemas de resfriamento evaporativo e de aquecimento do ar promoveram o amortecimento na amplitude de variação da temperatura do ar interno em relação ao externo de até 3,5 e 3,9 °C, respectivamente, amenizando os extremos que poderiam causar injúrias às plantas de tomate.

Em função do acréscimo de vapor d'água no ar interno, devido à transpiração das plantas e ao princípio do sistema de resfriamento (baseado na incorporação de vapor d'água ao ar para promover redução na temperatura), nota-se no gráfico da Figura 5.19 que, a umidade relativa do ar interno à casa de vegetação permaneceu sempre superior à externa durante o período diurno. O fato da umidade relativa do ar interno manter-se elevada (média de 81%) em relação à umidade relativa do ar externo (média de 72%) contribuiu para a ocorrência e a disseminação do mofo-cinzento (*Botrytis cinerea*) nas folhas do tomateiro.

### **5.5.3. Freqüências de fertirrigações em dias típicos de céu claro e de céu nublado**

O coeficiente da cultura ( $K_c$ ), estimado a partir da temperatura média diária do ar interno à casa de vegetação, foi a variável responsável pelo ajuste da freqüência de fertirrigações do sistema automático de acordo com o estágio de desenvolvimento do tomateiro. Além da temperatura do ar, outras variáveis micrometeorológicas também exerceram influência no número de fertirrigações realizadas pelo sistema automático, modificando os valores estimados de evapotranspiração da cultura de referência ( $ET_0$ ).

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os contrastes ocorridos nas freqüências dos eventos e nos volumes totais de fertirrigações realizadas pelos sistemas automático e convencional em um dia típico de céu claro (25/07/2006) e de céu nublado (30/07/2006), respectivamente. Estes dias foram selecionados considerando-se um coeficiente da cultura representativo do estágio inicial de desenvolvimento do tomateiro ( $K_c = 0,23$ ).

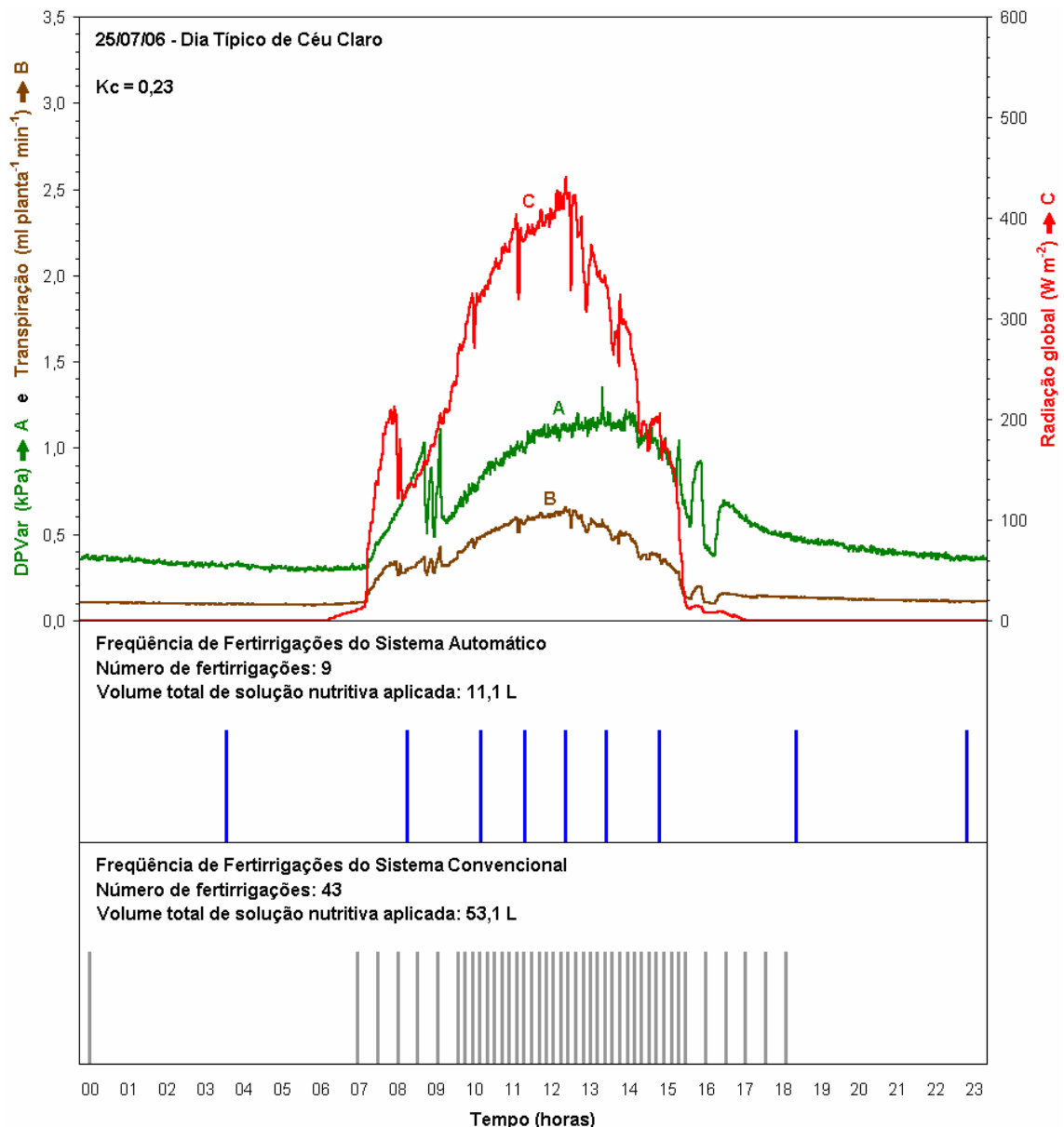


Figura 5.20. Variação das condições micrometeorológicas internas e marcha de acionamentos da bomba de fertirrigação para os sistemas automático e convencional, ao longo de um dia típico de céu claro ( $K_c = 0,23$ ).

Independentemente das condições micrometeorológicas predominantes no interior da casa de vegetação, tanto no dia típico de céu claro (Figura 5.20) quanto no dia típico de céu nublado (Figura 5.21), constataram-se diferenças marcantes entre os sistemas automático e convencional no que se refere ao número de fertirrigações e, conseqüentemente, ao volume total de solução nutritiva aplicada às plantas de tomate. A magnitude destas diferenças está associada ao reduzido coeficiente da cultura assumido nestes dias, o qual possibilitou ao sistema automático estimar adequadamente a real transpiração

das plantas de tomate para o estágio de desenvolvimento em que se encontravam.

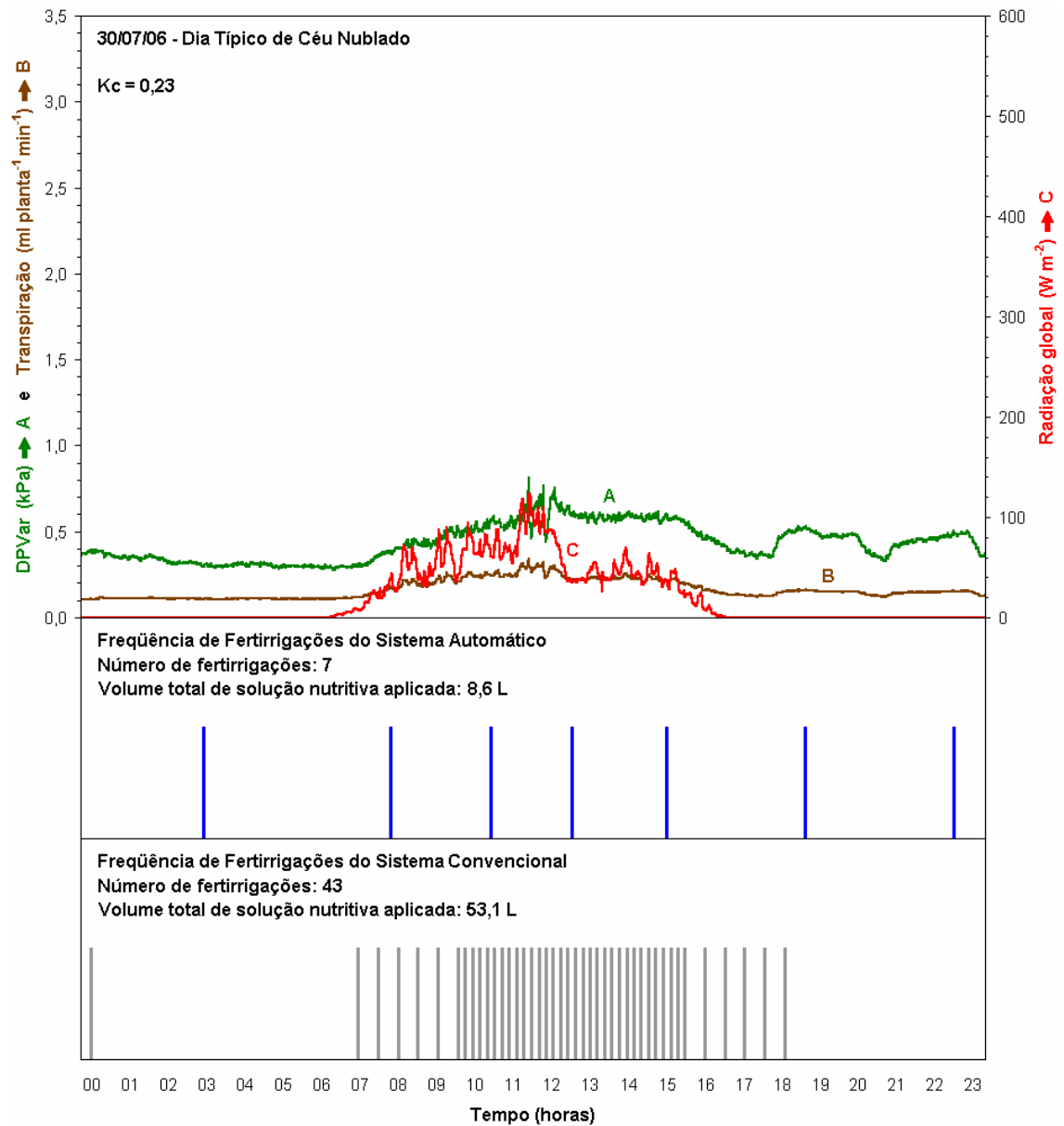


Figura 5.21. Variação das condições micrometeorológicas internas e marcha de acionamentos da bomba de fertirrigação para os sistemas automático e convencional, ao longo de um dia típico de céu nublado ( $K_c = 0,23$ ).

O sistema convencional, programado para suprir a demanda hídrica no estágio final de desenvolvimento do tomateiro em dias caracterizados por altos valores de radiação solar global e do déficit de pressão do vapor d'água no ar, realizou em ambos os dias típicos fertirrigações excessivas, muito além das reais necessidades das plantas. Assim sendo, nos dias 25/07/2006 (Figura 5.20) e 30/07/2006 (Figura 5.21) os volumes totais de solução nutritiva

aplicada às plantas de tomate excederam os reais requerimentos hídricos em 42,0 L e 44,5 L, respectivamente. Apesar de promover a “lavagem” do substrato, minimizando o acréscimo nos valores de condutividade elétrica, estas fertirrigações resultaram em um gasto desnecessário de água e nutrientes com conseqüente aumento no volume de efluente e maior consumo de energia elétrica.

De maneira geral, nos cultivos hidropônicos em que a freqüência de fertirrigações é controlada por meio de temporizadores, programados com base em recomendações empíricas, são evidenciadas, na maioria das vezes, superestimativas na demanda hídrica das plantas em razão destes controladores serem insensíveis às mudanças micrometeorológicas e ao desenvolvimento da cultura (PUGLIESI, 2003).

Ressalta-se que, em termos práticos, quando o volume de solução nutritiva drenada nos vasos de cultivo é demasiadamente alto, o produtor agrícola normalmente diminui o número de fertirrigações, reprogramando manualmente o temporizador que controla a freqüência e a duração dos eventos de aplicação da solução nutritiva. Todavia, existem muitos produtores que adotam a mesma freqüência e duração de fertirrigações ao longo de todo o ciclo da cultura (MAROUELLI et al., 2005).

Em função das condições micrometeorológicas internas à casa de vegetação no dia 25/07/2006, a freqüência de fertirrigações do sistema automático foi mais alta nos horários próximos ao meio dia, comparativamente aos demais horários. Já para o dia típico de céu nublado (Figura 5.21), as fertirrigações foram distribuídas em intervalos mais uniformes ao longo do período.

Apesar das condições micrometeorológicas internas à casa de vegetação, representadas pelas curvas do déficit de pressão do vapor d'água no ar interno, radiação solar global interna e transpiração estimada, terem sido bastante distintas entre os dias típicos de céu claro e de céu nublado (Figuras 5.20 e 5.21), o número de fertirrigações realizadas pelo sistema automático nestes dias típicos diferiu em apenas duas unidades. Esta comparação evidenciou que, no estágio inicial de desenvolvimento do tomateiro, o coeficiente da cultura assumiu papel de principal regulador da freqüência de fertirrigações do sistema automático.

De maneira análoga às duas figuras anteriores, os contrastes ocorridos nas frequências dos eventos e nos volumes totais de fertirrigações realizadas pelos sistemas automático e convencional em um dia típico de céu claro (13/09/2006) e de céu nublado (05/09/2006), com coeficiente da cultura representativo do estágio final de desenvolvimento do tomateiro ( $K_c = 0,91$ ), são mostrados nas Figuras 5.22 e 5.23, respectivamente.

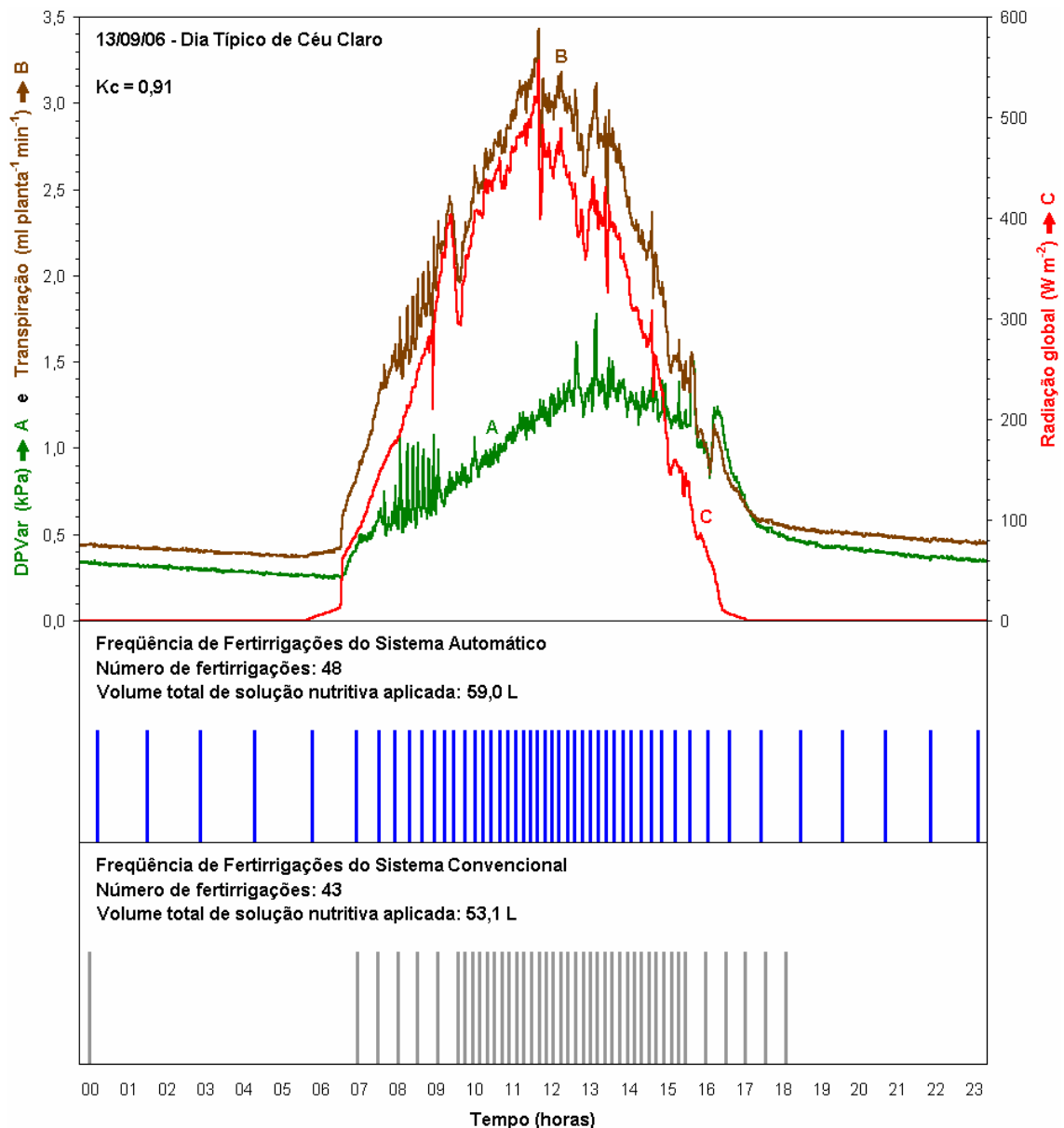


Figura 5.22. Variação das condições micrometeorológicas internas e marcha de acionamentos da bomba de fertirrigação para os sistemas automático e convencional, ao longo de um dia típico de céu claro ( $K_c = 0,91$ ).

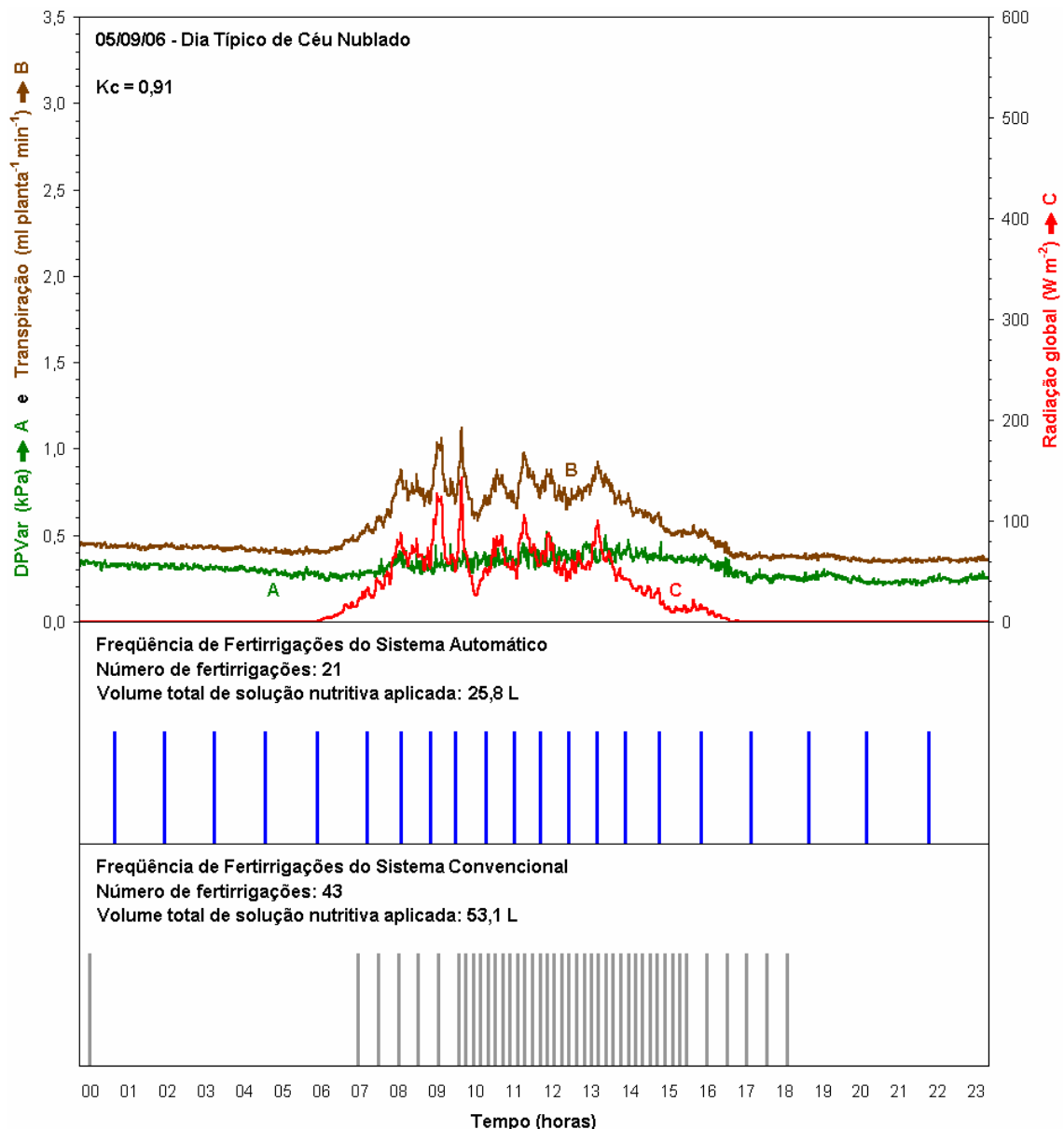


Figura 5.23. Variação das condições micrometeorológicas internas e marcha de acionamentos da bomba de fertirrigação para os sistemas automático e convencional, ao longo de um dia típico de céu nublado ( $K_c = 0,91$ ).

As diferenças nas frequências dos eventos e nos volumes totais de fertirrigações entre os sistemas automático e convencional, tanto para o dia típico de céu claro (Figura 5.22) quanto para o dia típico de céu nublado (Figura 5.23), não foram muito expressivas comparadas às das Figuras 5.20 e 5.21, em razão do elevado coeficiente da cultura ( $K_c = 0,91$ ). Especificamente no dia 13/09/2006 (Figura 5.22), houve um déficit no número de fertirrigações realizadas pelo sistema convencional de, aproximadamente, 10% em relação às fertirrigações do sistema automático, o que representou uma redução no volume total de solução nutritiva requerido pela cultura de quase 6 L. Este

déficit pode ser considerado aceitável para um sistema de fertirrigação como o utilizado neste experimento. Entretanto, no dia típico de céu nublado (Figura 5.23), o número de fertirrigações realizadas pelo sistema convencional superestimou bastante as reais exigências hídricas do tomateiro, causando desperdício de 27,3 L de solução nutritiva e de energia elétrica.

Comparando o número de fertirrigações efetuadas pelo sistema automático nos dias típicos de céu claro (Figura 5.22) e de céu nublado (Figura 5.23) verificou-se uma diferença de 27 fertirrigações, o que representa um percentual de 56% de acionamentos a menos no dia de céu nublado em relação ao dia de céu claro, para um mesmo coeficiente da cultura. Diferentemente das Figuras 5.20 e 5.21, esta marcante diferença no número de fertirrigações do sistema automático é atribuída principalmente às condições micrometeorológicas predominantes nestes dias.

Analisando-se os dias típicos de céu claro das Figuras 5.20 e 5.22, constatou-se que o sistema automático realizou um maior número de fertirrigações em resposta as altas taxas de transpiração da cultura ocorridas nos horários mais quentes. Inversamente, nos dias típicos de céu nublado (Figuras 5.21 e 5.23), em função da baixa demanda hídrica da cultura, o sistema de controle reduziu o número de fertirrigações. Portanto, o sistema automático ajustou de maneira eficiente e em tempo real a freqüência dos eventos de fertirrigação, conforme as necessidades das plantas. Estes resultados estão em concordância com os obtidos por HARMANTO et al. (2005) que, estimando os requerimentos hídricos de plantas de tomate sob condições de casa de vegetação por meio da equação de Penman-Monteith, confirmaram que as necessidades diárias de irrigação do tomateiro oscilam em função do microclima do respectivo dia e do estágio de desenvolvimento das plantas.

Fertirrigações excessivas, conforme as observadas nos gráficos das Figuras 5.20, 5.21 e 5.23, ou deficitárias (Figura 5.22) são evidenciadas na maioria dos cultivos nos quais os sistemas de controle de aplicação da solução nutritiva são temporizados (ROH e LEE, 1996).

De acordo com VAN OS (1999), os cultivos hidropônicos de plantas em substratos requerem, geralmente, altas freqüências de fertirrigações. Assim sendo, nos cultivos hidropônicos nos quais a solução nutritiva drenada não é recirculada, os elevados volumes de efluente, como os constatados no sistema

convencional pelo número de fertirrigações, podem causar prejuízos financeiros e ambientais caso não sejam empregados sistemas capazes de controlar a frequência e a duração dos eventos de fertirrigação de maneira adequada, como o sistema automático proposto neste trabalho.

#### 5.5.4. Uso eficiente de água e volumes acumulados de fertirrigações e drenagens

Na Figura 5.24 são apresentadas as linhas que representam os volumes acumulados de fertirrigações e de drenagens, referentes aos sistemas automático e convencional, contabilizadas após o transplântio das mudas para os vasos de cultivo. Adicionalmente, são mostradas nesta mesma figura barras horizontais representativas dos valores médios do Uso Eficiente de Água (UEA), obtidos a partir das repetições de cada tratamento, com os respectivos desvios padrão.

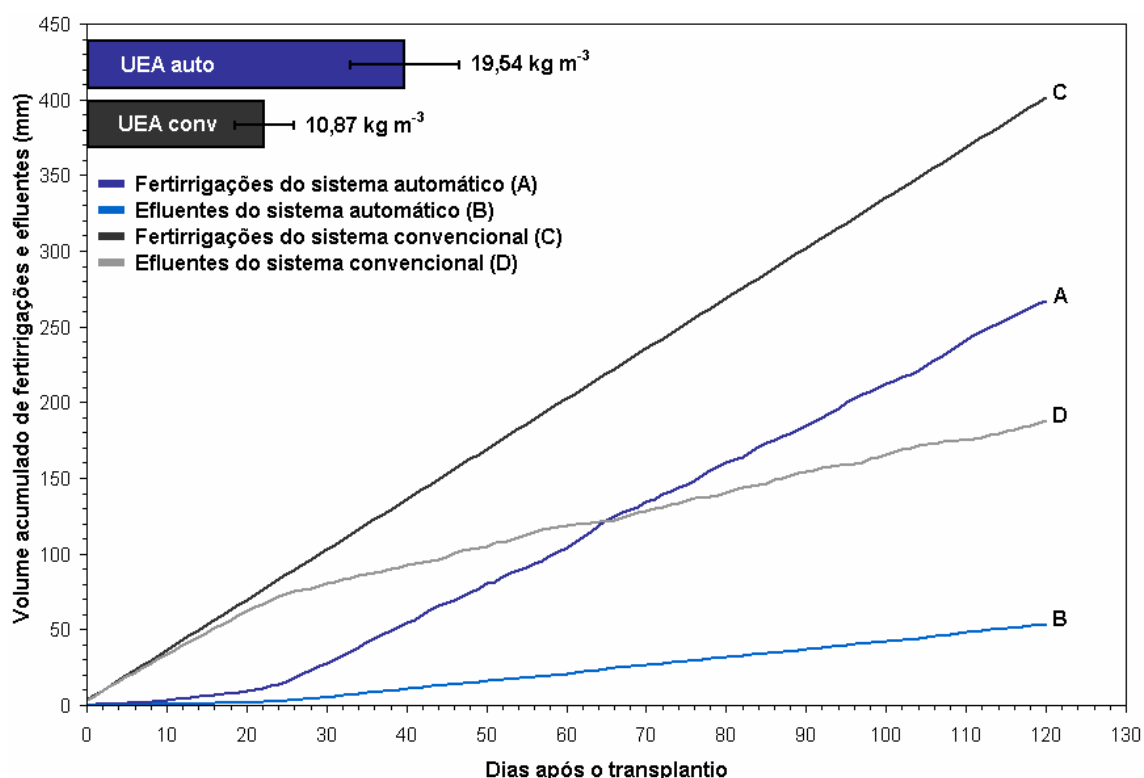


Figura 5.24. Uso eficiente de água e volumes acumulados de fertirrigações e de efluentes, associados aos sistemas automático e convencional, ao longo do período experimental após o transplântio.

Conforme constata-se pela Figura 5.24, a diferença entre os volumes acumulados de fertirrigações dos sistemas automático e convencional foi bastante expressiva, totalizando, aproximadamente, 135 mm de solução nutritiva. Este desperdício de água, nutrientes e energia elétrica promovido pelo sistema convencional refletiu-se diretamente no volume acumulado de efluente drenado nos vasos deste sistema (188 mm), o que representou 88% do volume total requerido para atender a real demanda hídrica das plantas ao longo de todo o período após o transplântio.

O volume acumulado de fertirrigações, referente ao sistema automático, aumentou seguindo um comportamento exponencial até próximo de 30 dias após o transplântio ( $\approx 350 \text{ GD}_{\text{acum}}$ ) e linear no período subsequente (Figura 5.24), adequando-se ao crescimento do tomateiro (Figura 5.11). Por outro lado, o volume acumulado, fertirrigado pelo sistema convencional, cresceu de maneira constante visto que, o número de eventos diários controlado pelo temporizador era fixo.

A razão entre o volume acumulado de fertirrigações do sistema automático (266,8 mm), descontando-se o excedente de 20% (53,4 mm), e a densidade de plantio das mudas de tomate ( $2 \text{ plantas m}^{-2}$ ) resultou no real consumo de solução nutritiva por planta de tomate ( $106,7 \text{ L planta}^{-1}$ ), requerido desde o transplântio até o término do experimento.

O uso eficiente de água obtido para o sistema automático foi bastante superior ao do sistema convencional (Figura 5.24). Do ponto de vista estatístico, estes valores foram significativamente diferentes ao nível de 1% de probabilidade. A diferença de  $8,7 \text{ kg m}^{-3}$  pode ser atribuída, principalmente, ao elevado volume de efluente drenado nos vasos do sistema convencional.

O valor médio do uso eficiente de água para o sistema automático ( $19,5 \text{ kg m}^{-3}$ ) é superior ao máximo obtido por SINGANDHUPE et al. (2003) de  $16,8 \text{ kg m}^{-3}$ , cerca de 21% maior ao relatado por MOFOKE et al. (2006) e próximo dos  $21,0 \text{ kg m}^{-3}$  alcançado por MAHAJAN e SINGH (2006).

O manejo adequado da frequência e da duração das fertirrigações, conforme realizado pelo sistema automático, resultou em melhor uso eficiente de água e impediu situações de estresse hídrico.

## 5.6. Comparações entre os sistemas automático e convencional referentes aos frutos do tomateiro

### 5.6.1. Classificação dos frutos por tamanho

O número médio de frutos colhidos por planta nas distintas classes de padronização por tamanho, propostas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2002), é apresentado na Tabela 5.2 para os sistemas automático e convencional. Neste experimento, em ambos os sistemas, não foram produzidos frutos de tomate classificados como gigante.

Tabela 5.2. Número médio de frutos por planta conforme a classificação de tamanho para tomates do grupo redondo, associados aos sistemas automático e convencional.

Classe	Maior diâmetro transversal do fruto	Sistema	Número médio de frutos por planta
Grande	maior que 80 até 100 mm	Automático	1,47 ( $\pm$ 0,33)
		Convencional	1,19 ( $\pm$ 0,71)
Médio	maior que 65 até 80 mm	Automático	7,78 ( $\pm$ 1,53)
		Convencional	5,97 ( $\pm$ 0,88)
Pequeno	maior que 50 até 65 mm	Automático	10,50 ( $\pm$ 1,68)
		Convencional	10,44 ( $\pm$ 1,65)
Miúdo (não comercial)	menor que 50 mm	Automático	10,25 ( $\pm$ 1,72)
		Convencional	12,41 ( $\pm$ 2,67)
Frutos comerciais		Automático	19,75 ( $\pm$ 1,72)
(classes Grande, Médio e Pequeno)		Convencional	17,59 ( $\pm$ 2,67)

Os valores entre parênteses representam os desvios padrão das repetições.

Todas as médias não diferiram significativamente ao nível de 5% de probabilidade (teste "F").

Constata-se pela Tabela 5.2 que, dentre as classes comerciais, em ambos os sistemas, os maiores valores foram obtidos para os frutos classificados como pequenos. Complementarmente, os números médios de frutos não comerciais (miúdos) também foram expressivos. O principal motivo que pode justificar estes resultados está provavelmente associado à sensibilidade a salinidade pela cultivar Duradoro. A influência da salinidade

sobre o desenvolvimento das plantas, o tamanho dos frutos e a produtividade do tomateiro depende da cultivar, das condições micrometeorológicas do ambiente e das técnicas de cultivo e manejo adotadas (SHANNON e GRIEVE, 1999; ROMERO et al., 2001; CARMASSI et al., 2007).

Todos os resultados comparativos entre os sistemas automático e convencional, mostrados na Tabela 5.2, não foram significativamente diferentes ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “F”. Entretanto, considerando-se o nível de significância de 9% para o teste “F”, justificável em função do curto tempo de experimentação, a análise de variância apresentou diferença significativa entre os sistemas para os frutos classificados como de tamanho médio.

### 5.6.2. Produtividade total e comercial da cultura do tomateiro

Na Tabela 5.3 são fornecidas informações relativas à produtividade total e comercial da cultura do tomateiro para os sistemas automático e convencional.

Tabela 5.3. Produtividade total e comercial da cultura do tomateiro para os sistemas automático e convencional.

	Sistema	
	Automático	Convencional
<b>Produtividade Total</b>		
MMF* por planta (g fruto <sup>-1</sup> )	100,12 (± 6,89)	90,60 (± 9,95)
Produtividade (kg planta <sup>-1</sup> )	3,00 (± 0,21)	2,72 (± 0,30)
Produção total do experimento (kg)	183,10	
<b>Produtividade Comercial</b>		
MMF* da classe Grande (g fruto <sup>-1</sup> )	247,55 (± 7,28)	245,40 (± 6,85)
MMF* da classe Médio (g fruto <sup>-1</sup> )	171,01 (± 3,63)	168,57 (± 5,56)
MMF* da classe Pequeno (g fruto <sup>-1</sup> )	85,11 (± 3,66)	84,65 (± 3,93)
Produtividade (kg planta <sup>-1</sup> )	2,58 (± 0,26)	2,18 (± 0,40)
Produção comercial do experimento (kg)	152,41	

\* MMF = Massa Média dos Frutos.

Os valores entre parênteses representam os desvios padrão das repetições.

Todas as médias não diferiram significativamente ao nível de 5% de probabilidade (teste “F”).

Não houve efeito significativo dos sistemas automático e convencional sobre a produtividade total e comercial da cultura do tomateiro (Tabela 5.3), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “F”.

Os principais fatores que podem ter contribuído para que as massas médias dos frutos do sistema convencional fossem um pouco menores, comparativamente às do sistema automático (Tabela 5.3), são a elevada condutividade elétrica do substrato na fase final de crescimento do tomateiro (salinização) e o número excessivo de fertirrigações. De acordo com SANTAMARIA et al. (2003), a salinidade causa decréscimo na produtividade total e comercial pela diminuição da massa média dos frutos, entretanto, promove melhorias na qualidade do tomate. Esta afirmativa está em concordância com os resultados apresentados na Tabela 5.3 e com os obtidos em cultivos hidropônicos realizados por DEL AMOR et al. (1999) com melão, NAVARRO et al. (2002) com pimentão e ROUPHAEL et al. (2006) com abobrinha. Quanto às fertirrigações, PEET e WILLITS (1995) afirmam que eventos excessivos podem causar redução na produtividade e maior suscetibilidade a rachaduras na película dos frutos do tomateiro.

Apesar da diferença de produtividade comercial entre os sistemas automático e convencional ter sido de, aproximadamente, 16%, o que representa um bom incremento de produção, estatisticamente não foi significativa.

Dentre as principais razões para as análises de variância não apresentarem diferenças estatísticas significativas em relação aos frutos, destaca-se a climatização da casa de vegetação utilizada no cultivo do tomateiro, especificamente o sistema de resfriamento do ar, que impediu o aumento de temperatura acima de 30 °C e o conseqüente acréscimo nas taxas de transpiração da cultura, atenuando a elevação da condutividade elétrica do substrato e, assim, contribuindo para que o processo de salinização nos vasos do sistema convencional não fosse intensificado. Este efeito de diminuição do estresse osmótico em plantas, utilizando um painel de resfriamento evaporativo do ar associado a exaustores, foi comprovado por FUCHS et al. (2006) em rosas cultivadas em substrato com solução nutritiva, sob condições de casa de vegetação climatizada. Adicionalmente, como houve predominância de dias com nebulosidade variando de moderada a alta a partir do estágio intermediário de desenvolvimento do tomateiro até o término do experimento, o

excessivo número de fertirrigações realizado nestes dias pelo sistema convencional promoveu a redução da condutividade elétrica do substrato, minimizando a salinização.

Nos cultivos de tomateiros em casas de vegetação não climatizadas, conduzidos durante o período seco do ano ou em épocas nas quais ocorram uma melhor distribuição de dias de céu claro em relação aos dias nublados, as diferenças no que se refere aos frutos, provavelmente, serão marcantes entre os sistemas automático e convencional. Nestas condições, o processo de salinização do substrato de um sistema de controle temporizado, como o convencional, seria intensificado, refletindo-se em decréscimos na produtividade e em um alto índice de distúrbios fisiológicos nos frutos como, por exemplo, a podridão apical.

KLÄRING e SCHWARZ (1999) propuseram uma estratégia de controle para a concentração da solução nutritiva com base em modelos de fotossíntese (estimativa da absorção de nutrientes) e transpiração (estimativa da absorção de água). Esta estratégia foi avaliada sob condições de casa de vegetação, onde foram cultivadas plantas de tomate em substrato de lã mineral. Foram realizadas comparações entre as plantas submetidas à estratégia proposta e as plantas cultivadas com dois valores fixos de condutividade elétrica ao longo de todo o ciclo do tomateiro (2 e 4 dS m<sup>-1</sup>). Também neste trabalho, os resultados demonstraram que não houve diferença significativa entre os tratamentos no que se refere à produtividade total e comercial.

MAIA et al. (1999) desenvolveram um sistema automático, baseado em um simples dispositivo eletromecânico, para o fornecimento de solução nutritiva com o objetivo de melhorar os resultados obtidos em trabalhos de pesquisa envolvendo a nutrição de plantas cultivadas pela técnica da hidroponia. O cultivo de plantas de hortelã (*Mentha crispa*) pelo referido sistema resultou em uma produção de folhas cerca de três vezes maior comparativamente ao sistema convencional, manejado manualmente.

### **5.6.3. Sólidos solúveis totais (Brix)**

Em termos médios, os resultados obtidos para sólidos solúveis totais nos frutos do sistema automático e convencional foram de 4,5 e 4,7 °Brix, respectivamente. Apesar destes valores não serem significativamente

diferentes ao nível de 5% de probabilidade (teste “F”), o valor médio de sólidos solúveis referente ao sistema convencional foi sutilmente superior ao do sistema automático devido, possivelmente, à maior condutividade elétrica do substrato nos vasos de cultivo associados ao sistema convencional.

SELEGUINI et al. (2006) estudando as interações de diferentes espaçamentos entre plantas e número de cachos sobre a produtividade e a qualidade dos frutos do tomateiro (híbrido Duradoro) cultivado em solo de textura média/argilosa sob condições de casa de vegetação, constataram variações médias no teor de sólidos solúveis totais de 4,5 a 4,7 °Brix. Segundo COELHO (2001), valores próximos de 4,0 °Brix para sólidos solúveis totais são comumente encontrados para tomates frescos de maturação completa. No entanto, algumas variedades de tomate podem apresentar valores mais altos, próximos de 6,0 °Brix.

O fato do valor de condutividade elétrica, preestabelecido como desejado para a solução drenada, ter sido um pouco elevado ( $3 \text{ dS m}^{-1}$ ), contribuiu para o aumento no teor de sólidos solúveis totais e, conseqüentemente, na qualidade dos frutos. REINA-SÁNCHEZ et al. (2005) analisando os efeitos da salinidade em quatro cultivares de tomate sobre a produtividade, a absorção de água pelas plantas, o uso eficiente de água e a qualidade dos frutos, verificaram que os sólidos solúveis totais aumentaram linearmente com o acréscimo de salinidade no substrato. Este mesmo comportamento também foi constatado por CUARTERO e FERNÁNDEZ-MUÑOZ (1999).

#### **5.6.4. Podridão apical (fundo preto)**

A podridão apical trata-se de um distúrbio fisiológico caracterizado por uma mancha preta, de aparência coriácea, seca e firme no ápice do fruto do tomateiro (ALVARENGA, 2004).

Os frutos das plantas nas quais as fertirrigações foram controladas pelo sistema automático não apresentaram podridão apical. Entretanto, no sistema convencional, houve a incidência de fundo preto em sete frutos de plantas diferentes (Figura 5.25).

Provavelmente, a ocorrência deste distúrbio fisiológico em alguns frutos do sistema convencional está associada à deficiência de cálcio induzida pelo

maior fornecimento de nutrientes devido ao grande número de eventos de fertirrigação realizados nos dias de nebulosidade alta e moderada. Este fator, segundo MARTINEZ (2004), pode ter ocasionado competição com outros cátions presentes no substrato ( $K^+$ ,  $Mg^{++}$  e particularmente  $NH_4^+$ ) resultando na diminuição da absorção de cálcio pelas raízes e acarretando deficiência nos frutos. De acordo com PAPADOPOULOS (1991), na maioria dos casos, a deficiência de cálcio é causada pelo estresse de água na planta devido a irrigações deficitárias ou excessivas. BOYHAN e KELLEY (2006) afirmam que, variações acentuadas na umidade do substrato, como também irrigações demasiadas, contribuem para a incidência de podridão apical nos frutos.



Figura 5.25. Podridão estilar no fruto de tomate associado ao sistema convencional.

## 6. Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que os circuitos eletrônicos propostos possibilitaram medidas de condutividade elétrica de soluções na faixa de 0,10 a 10,15 dS m<sup>-1</sup> com alta exatidão, precisão e confiabilidade, compensando automaticamente as variações instantâneas de temperatura compreendidas entre 10 e 40 °C. O baixo custo dos componentes dos circuitos, a aquisição de dados por meio de um simples computador via porta paralela ou placa de entradas/saídas digitais e a fácil adaptação a sistemas de controle, tornam estes circuitos eletrônicos ideais para aplicações nas quais seja necessário monitorar e controlar a condutividade elétrica e a temperatura de soluções nutritivas em tempo real, de maneira ininterrupta e com custo reduzido.

O sistema computadorizado para o preparo e aplicação de soluções nutritivas mostrou-se eficiente no controle da condutividade elétrica, minimizando os desvios em relação ao valor desejado (3 dS m<sup>-1</sup>).

O modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith, padronizado pela FAO em 1998 e modificado a fim de propiciar estimativas mais coerentes sob condições de casa de vegetação, possibilitou a predição dos valores de transpiração da cultura do tomateiro com exatidão adequada ao controle das frequências de fertirrigações do sistema automático. Em função disso, foram evitadas fertirrigações desnecessárias e, conseqüentemente, desperdícios de solução nutritiva, principalmente em horários nos quais a demanda hídrica da cultura era reduzida.

De maneira geral, o sistema convencional (temporizado) realizou um número excessivo de eventos de fertirrigação, muito além das reais necessidades hídricas das plantas, principalmente durante o estágio inicial de desenvolvimento do tomateiro e nos dias de nebulosidade moderada e alta. Apesar de promover a “lavagem” do substrato de areia, minimizando o aumento da condutividade elétrica e a intensificação do processo de salinização, estas fertirrigações resultaram em demanda desnecessária de solução nutritiva, aumento no volume de efluente descartado, elevado consumo de energia elétrica e maior requerimento de manutenção, visto que, em função de um número excessivo de acionamentos em quase todos os dias do período

experimental, o desgaste da bomba de fertirrigação do sistema convencional foi superior ao das bombas do sistema automático.

Apesar de não terem sido constatadas diferenças estatísticas entre os sistemas automático e convencional no que se refere à classificação dos frutos por tamanho, à produtividade total e comercial e ao teor de sólidos solúveis totais, foi verificado um incremento na produtividade de 16% favorável ao sistema automático. Além disso, o sistema de controle proposto proporcionou maior economia de mão-de-obra, fertilizantes, recursos hídricos e energia elétrica.

O uso eficiente de água, variável representativa da contribuição das fertirrigações sobre a produtividade do tomateiro, resultou em um percentual de, aproximadamente, 45% superior para o sistema automático comparativamente ao convencional.

Portanto, o sistema computadorizado de controle do preparo, da concentração, da frequência e da duração de aplicação de soluções nutritivas tem enorme potencial para contribuir no desenvolvimento da automação de sistemas de cultivos hidropônicos no Brasil.

## 7. Referências Bibliográficas

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**. Rome: FAO, v. 56. 1998. 300 p.
- ALVARENGA, M. A. R. **Tomate**: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia. Lavras: UFLA, 2004. 400 p.
- ANALION. **Condutividade**. Disponível em: <<http://www.analion.com.br/index>>. Acesso em: 11 maio 2007.
- ANDRIOLO, J. L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Santa Maria: UFSM, 1999. 142 p.
- ANDRIOLO, J. L.; LUZ, G. L.; GIRALDI, C.; GODOI, R. S.; BARROS, G. T. Cultivo hidropônico da alface empregando substratos: uma alternativa a NFT? **Horticultura Brasileira**, v. 22. n. 4. p. 794-798. 2004.
- AXELSON, J. **Parallel port complete**: programming, interfacing and using the PC's parallel printer port. 1996. Disponível em: <<http://www.lvr.com/files/ppc1.pdf>>. Acesso em: 15 fevereiro 2007.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. Water quality for agriculture. **Irrigation and Drainage Paper**. Rome: FAO, v. 29. 1985. 174 p.
- BARRETT, D. M.; GARCIA, E.; WAYNE, J. E. Textural modification of processing tomatoes. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 38. n. 3. p. 173-258. 1998.
- BOLTON, W. **Engenharia de controle**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1995. 497 p.
- BOMAN, B.; SMITH, S.; TULLOS, B. **Control and automation in citrus microirrigation systems**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, CIR 1413. 15 p. 2002.
- BOMAN, B.; SHUKLA, S.; HAMAN, D. **Chemigation equipment and techniques for citrus**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, CIR 1403. 18 p. 2004.
- BOYHAN, G.; KELLEY, W. T. Physiological problems. In: **Commercial tomato production handbook**. Cooperative Extension, University of Georgia, 2006. n. 1312. p. 18-20.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SARC nº 085 de 06 de março de 2002. Propõe o Regulamento técnico de identidade e qualidade para classificação do tomate. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, março, 2002. (consulta pública).
- BURT, C.; O'CONNOR, K.; RUEHR, T. **Fertigation**. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 1995. 320 p.

- CARMASSI, G.; INCROCCI, L.; MAGGINI, R.; MALORGIO, F.; TOGNONI, F.; PARDOSSI, A. An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water. **Agricultural Water Management**, v. 88. p. 73-82. 2007.
- COELHO, N. R. A. **Perfil sensorial de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seco em conserva**. 2001. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- COLE-PARMER. **pH, ISE, conductivity and oxygen products**: electrochemistry solutions catalog. Cole-Parmer Instrument Company, 2000. 144 p.
- COLE-PARMER. **Conductivity**. Cole-Parmer Technical Library. Disponível em: <<http://www.coleparmer.com/techinfo/techinfo.asp?htmlfile=Conductivity.htm>>. Acesso em: 07 fevereiro 2007.
- CUARTERO, J.; FERNÁNDEZ-MUÑOZ, R. Tomato and salinity. **Scientia Horticulturae**, v. 78. p. 83-125. 1999.
- D'AZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Linear control system analysis and design**. 4. ed. Singapore: McGraw Hill, 1995. 763 p.
- DeFELICE, T. P. **An introduction to meteorological instrumentation and measurement**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 229 p.
- DEL AMOR, F. M.; MARTINEZ, V.; CERDÁ, A. Salinity duration and concentration affect fruit yield and quality, and growth and mineral composition of melon plants grown in perlite. **HortScience**, v. 34. n. 7. p. 1234-1237. 1999.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. M. **Modern control systems**. 8. ed. Menlo Park: Addison Wesley Longman Inc., 1998. 855 p.
- EMBRAPA HORTALIÇAS. **Tomate Duradoro**: o nome já diz tudo. Disponível em: <<http://www.cnph.embrapa.br/cultivares/duradoro.htm>>. Acesso em: 18 setembro 2006.
- FEITOSA FILHO, J. C.; BOTREL, T. A.; PINTO, J. M. Influência das formas de instalação no desempenho de injetores tipo Venturi utilizados na quimigação. **Actas de Horticultura**, v. 19. n. 1. p. 443-449. 1997.
- FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A. Aplicação de fertilizantes via água de irrigação. In: BOARETTO, A. E.; VITTI, G. C. **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: [s.n.], 1994. v. 1. p. 227-260.
- FUCHS, M.; COHEN, Y.; LI, Y.; GRAVA, A. Evaporative cooling pad attenuates osmotic stress in closed-loop irrigated greenhouse roses. **Scientia Horticulturae**, v. 111. p. 56-62. 2006.
- FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 1999. Boletim Técnico n. 180. 52 p.
- GARTLEY, K. L. **Recommended soluble salts tests**. 1995. Disponível em: <<http://ag.udel.edu/extension/agnr/pdf/soiltesting/CP10-95.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2007.

GRAS, R. Propriétés physiques des substrats. In: \_\_\_\_\_. **Les cultures hors sol**. Paris: INRA, 1987. p. 80-126.

HAMAN, D. Z.; IZUNO, F. T.; SMAJSTRLA, A. G. **Positive displacement pumps for agricultural applications**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, CIR 826. 10 p. 2003a.

HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A. G.; ZAZUETA, F. S. **Chemical injection methods for irrigation**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, CIR 864. 9 p. 2003b.

HARMANTO; SALOKHE, V. M.; BABEL, M. S.; TANTAU, H. J. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. **Agricultural Water Management**, v. 71. p. 225-242. 2005.

HOCHMUTH, G. J. Fertilizer management for greenhouse vegetables. In: **Florida greenhouse vegetable production handbook**. Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, HS 787. v. 3. 23 p. 2001a.

HOCHMUTH, G. J. Irrigation of greenhouse vegetables. In: **Florida greenhouse vegetable production handbook**. Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, HS 786. v. 3. 5 p. 2001b.

HUMPHRIES, J. T.; SHEETS, L. S. **Industrial electronics**. 4. ed. Albany: Delmar Publisher Inc., 1999. 718 p.

INCROCCI, L.; MALORGIO, F.; DELLA BARTOLA, A.; PARDOSSI, A. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water. **Scientia Horticulturae**, v. 107. p. 365-372. 2006.

INIESTA, T. M. Automatismos y sensores de actuación. In: FERNÁNDEZ, F. M.; GÓMEZ, I. M. C. **Cultivos sin suelo II**. Almería: Dirección General de Investigación y Formación Agraria, 1999. p. 321-332.

ISMAIL, M. R.; AHMAD, R. Differential growth and yield responses of tomato plants grown in different solution concentrations using nutrient film technique and sand culture. **Acta Horticulturae**, v. 450. p. 449-456. 1997.

JONES, J. W.; DAYAN, E.; JONES, P.; SEGNER, I.; ALLEN, L. H.; ZIPORI, I. **On-line computer control system for greenhouses under high radiation and temperature zones**. Agricultural Engineering Department, University of Florida, Gainesville, p. 871-874. 1989.

JONES, H. G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1992. 428 p.

JONES JR., J. B. **A guide for the hydroponic and soilless culture grower**. Oregon: Timber Press, 1983. 124 p.

- KATSOULAS, N.; KITTAS, C.; DIMOKAS, G.; LYKAS, C. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. **Biosystems Engineering**, v. 93. n. 2. p. 237-244. 2006.
- KLÄRING, H. P.; SCHWARZ, D.; HEIßNER, A. Control of nutrient solution concentration in tomato crop using models of photosynthesis and transpiration: a simulation study. **Acta Horticulturae**, v. 450. p. 329-334. 1997.
- KLÄRING, H. P.; SCHWARZ, D. Model-based control of concentration of nutrient solution in glasshouse tomato cultivation. **Acta Horticulturae**, v. 507. p. 127-132. 1999.
- KU, C. S. M.; HERSHEY, D. R. Leachate electrical conductivity and growth of potted poinsettia with leaching fractions of 0 to 0.4. **Journal of American Society Horticultural Science**, v. 116. n. 5. p. 802-806. 1991.
- KU, C. S. M.; HERSHEY, D. R. Leachate electrical conductivity and growth of potted geranium with leaching fractions of 0 to 0.4. **Journal of American Society Horticultural Science**, v. 117. n. 6. p. 893-897. 1992.
- KUO, B. C. **Automatic control systems**. 7. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 659 p.
- LI, Y. L.; STANGHELLINI, C.; CHALLA, H. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 88. p. 11-29. 2001.
- LYNX. **Conceitos básicos de aquisição de dados**. Lynx Tecnologia. Disponível em: <[http://www.lynxtec.com.br/tutor\\_aqd.htm](http://www.lynxtec.com.br/tutor_aqd.htm)>. Acesso em: 27 janeiro 2007.
- MAHAJAN, G.; SINGH, K. G. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. **Agricultural Water Management**, v. 84. p. 202-206. 2006.
- MAIA, N. B.; CARMELLO, Q. A. C.; MARQUES, M. O. M. Sistema automático de fornecimento de solução nutritiva para cultivo hidropônico de plantas em vasos. **Scientia Agricola**, v. 56. n. 1. p. 103-110. 1999.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda, 1981. 596 p.
- MARQUELLI, W. A.; CALBO, A. G.; CARRIJO, O. A. Avaliação de sensores do tipo IRRIGAS<sup>®</sup> para o controle da irrigação em hortaliças cultivadas em substrato. **Revista Irriga**, v. 10. n. 1. p. 88-95. 2005.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação por gotejamento do tomateiro industrial durante o estágio de frutificação, na região de Cerrado. **Horticultura Brasileira**, v. 24. n. 3. p. 342-346. 2006.
- MARTINEZ, H. E. P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa**. Viçosa, Minas Gerais: UFV, 1999. Caderno Didático n. 1. 47 p.

- MARTINEZ, H. E. P. Distúrbios nutricionais em hortaliças cultivadas em substratos com baixa atividade química. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATO PARA PLANTAS, 4., 2004, Viçosa, MG. **Palestras...** Viçosa: UFV, 2004. p. 129-157.
- MARTINEZ, H. E. P.; SILVA FILHO, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa, Minas Gerais: UFV, 2004. 111 p.
- McNAUGHTON, K. G.; JARVIS, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: KOZLOWSKI, T. T. **Water deficits and plant growth**. [S.I.]: Academic Press, 1983. v. 7. p. 1-47.
- MOESEL, B. Light and temperature sensitive mist controllers. In: INTERNATIONAL PLANT PROPAGATORS SOCIETY, 1987, [S.I.]. **Proceedings...** [S.I.: s.n.], 1987. v. 37. p. 509-513.
- MOFOKE, A. L. E.; ADEWUMI, J. K.; BABATUNDE, F. E.; MUDIARE, O. J.; RAMALAN, A. A. Yield of tomato grown under continuous-flow drip irrigation in Bauchi state of Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 84. p. 166-172. 2006.
- MONTAG, U. Fertigation in Israel. In: IFA AGRICULTURAL CONFERENCE ON MANAGING PLANT NUTRITION. Barcelona: [s.n.], 1999. 24 p.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIA OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY. [S.I.: s.n.], 1965. v. 19. p. 205-234.
- MOORE, D. P. Physiological effects of pH on plant roots. In: CARSON, E. W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 135-151.
- MORAES, C. A. G.; FURLANI, P. R. Cultivo de hortaliças de frutos em hidroponia em ambiente protegido. In: EPAMIG. **Informe agropecuário: cultivo protegido de hortaliças em solo e hidroponia**. Belo Horizonte: Epamig, 1999. v. 20. n. 200/201. p. 105-113.
- MUCKLE, M. E. **Basic hydroponics for do-it-yourselfer**. 13. ed. Princeton: Growers Press Inc., 1995. 200 p.
- NATHAN, R. **La fertilizacion combinada con el riego: fertiriego**. Tel-Aviv: Ministério da Agricultura de Israel, 1994. 55 p.
- NAVARRO, J. M.; GARRIDO, C.; CARVAJAL, M.; MARTINEZ, V. Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity. **Journal of Horticulture Science and Biotechnology**, v. 77. n. 1. p. 52-57. 2002.
- NELSON, P. V. **Greenhouse operation and management**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1991. 612 p.
- NISE, N. S. **Control systems engineering**. 2. ed. Singapore: Addison Wesley Longman Inc., 1998. 853 p.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Prentice Hall, 1998. 929 p.

- PAPADOPOULOS, A. P. **Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media**. Ontario: [s.n.], 1991. 79 p.
- PEET, M. M.; WILLITS, D. H. Role of excess water in tomato fruit cracking. **Horticultural Science**, v. 30. p. 65-68. 1995.
- PENNISI, B.; KESSLER, R. **Fertilizer injectors**: selection, maintenance and calibration. College of Agricultural and Environmental Sciences, Cooperative Extension Service, University of Georgia, 2003. n. 1237. 16 p.
- PEREIRA, P. R. G.; MARTINEZ, H. E. P. Produção de mudas para o cultivo de hortaliças em solo e hidroponia. In: EPAMIG. **Informe agropecuário: cultivo protegido de hortaliças em solo e hidroponia**. Belo Horizonte: Epamig, 1999. v. 20. n. 200/201. p. 24-31.
- PEREIRA, A. R. The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125. p. 305-313. 2004.
- PIZARRO, C. F. **Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.
- PUGLIESI, N. L. **Capacidade de retenção e freqüência de aplicação de solução nutritiva ao sistema radicular da alface em cultivo hidropônico (NFT)**. 2003. 98 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- RADIOMETER ANALYTICAL. **Conductivity: theory and practice guide**. France, 2007. Disponível em: <<http://www.radiometer-analytical.com/pdf/meterlab>>. Acesso em: 7 janeiro 2007.
- REINA-SÁNCHEZ, A.; ROMERO-ARANDA, R.; CUARTERO, J. Plant water uptake and water use efficiency of greenhouse tomato cultivars irrigated with saline water. **Agricultural Water Management**, v. 78. p. 54-66. 2005.
- RESH, H. M. **Hydroponic food production**. 5. ed. California: Woodbridge Press Publishing Company, 1998. 527 p.
- RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model: a case study from Southern Italy. **Agricultural Water Management**, v. 87. p. 91-105. 2007.
- ROH, M. Y.; LEE, Y. B. Control of amount and frequency of irrigation according to integrated solar radiation in cucumber substrate culture. **Acta Horticulturae**, v. 440. p. 332-337. 1996.
- ROMERO, A. R.; SORIA, T.; CUARTERO, J. Tomato plant water uptake and plant water relationships under saline growth conditions. **Plant Science**, v. 160. n. 2. p. 265-272. 2001.
- ROUPHAEL, Y.; CARDARELLI, M.; REA, E.; BATTISTELLI, A.; COLLA, G. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions. **Agricultural Water Management**, v. 82. p. 99-117. 2006.

- SANTAMARIA, P.; CAMPANILE, G.; PARENTE, A.; ELIA, A. Subirrigation versus drip-irrigation: effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato. **Journal of Horticulture Science and Biotechnology**, v. 78. n. 3. p. 290-296. 2003.
- SCHWARZ, D.; KUCHENBUCH, R. Growth analysis of tomato in a closed recirculating system in relation to the ec-value of the nutrient solution. **Acta Horticulturae**, v. 450. p. 169-176. 1997.
- SCHWARZENBACH, J.; GILL, K. F. **System modeling and control**. 3. ed. London: Edward Arnold, 1992. 340 p.
- SELEGUINI, A.; SENO, S.; FARIA JÚNIOR, M. J. A. Espaçamento entre plantas e número de racimos para tomateiro em ambiente protegido. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 28. n. 3. p. 359-363. 2006.
- SHANNON, M. C.; GRIEVE, C. M. Tolerance of vegetables crops to salinity. **Science Horticultural**, v. 78. p. 5-38. 1999.
- SIMONNE, E. H. Water management for tomato. In: FLORIDA TOMATO INSTITUTE, 2005, Naples. **Proceedings...** Florida: [s.n.], 2005. p. 35-38.
- SINGANDHUPE, R. B.; RAO, G. G. S. N.; PATIL, N. G.; BRAHMANAND, P. S. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.). **European Journal of Agronomy**, v. 19. p. 327-340. 2003.
- SPINU, V. C.; LANGHANS, R. W.; ALBRIGHT, L. D. Electrochemical pH control in hydroponic systems. **Acta Horticulturae**, v. 456. p. 275-282. 1998.
- STEIDLE NETO, A. J. **Avaliação do sistema 1-wire™ para aquisição de dados de temperatura em instalações agrícolas**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S.; MAROUELLI, W. A.; CARRIJO, O. A.; MARTINEZ, H. E. P. Avaliação de um circuito eletrônico para medição da condutividade elétrica de soluções nutritivas. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 25. n. 2. p. 427-435. 2005.
- STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S. Avaliação de um circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 26. n. 2. p. 335-343. 2006.
- TAYLOR, H. R. **Data acquisition for sensor systems**. London: Chapman & Hall, 1997. 327 p.
- TRANI, P. E.; CARRIJO, O. A. **Fertirrigação em hortaliças**. Campinas: IAC, 2004. Boletim Técnico n. 196. 53 p.
- VAN OS, E. A. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. **Water Science Technology**, v. 39. p. 105-112. 1999.

- VAN OS, E. A.; GIELING, T. H.; RUIJS, M. N. A. Equipment for hydroponic installations. In: SAVVAS, D.; PASSAM, H. C. **Hydroponic production of vegetables and ornamentals**. Athens: Embryo Publications, 2002. p. 103-141.
- WALKER, I. **Using conductivity meters in agriculture**. Bowen Horticultural Research Station, Queensland Horticulture Institute, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.qld.gov.au/horticulture.html>>. Acesso em: 02 fevereiro 2007.
- WALKER, J. N.; ALDRICH, R. A.; SHORT, T. H. Quantity of air flow for greenhouse structures. In: HELICKSON, M. A.; WALKER, J. N. **Ventilation of agricultural structures**. St. Joseph: ASAE, 1983. p. 169-191.
- WANG, J. Y.; FELTON, C. M. M. **Instruments for physical environmental measurements**. 2. ed. Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, 1983. 317 p.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research Oceans**, v. 90. p. 8995-9005. 1985.
- WOLF, S.; RUDICH, J.; MARANI, A.; REKAH, Y. Predicting harvesting date of processing tomatoes by a simulation model. **Journal of American Society Horticultural Science**, v. 111. p. 11-16. 1986.
- WTW. **Conductivity Primer**. Wissenschaftlich Technische Werkstätten GmbH. Germany, 2002. Disponível em: <<http://www.wtw.com/downloads>>. Acesso em: 10 julho 2006.
- YEAGER, T. Y.; HENLEY, R. W. **Techniques of diluting solution fertilizers in commercial nurseries and greenhouses**. Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, CIR 695. 1986.
- ZANINI, J. R.; VILLAS BÔAS, R. L.; FEITOSA FILHO, J. C. **Uso e manejo da fertirrigação e hidroponia**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. 65 p.
- ZAZUETA, F. S.; SMAJSTRLA, A. G.; CLARK, G. A. **Irrigation system controllers**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, SSAGE22. 8 p. 2002.
- ZIESLIN, N. Effect of pH the root environment on leakage from plant roots. **Acta Horticulturae**, v. 361. p. 282-293. 1994.
- ZOLNIER, S.; GATES, R. S.; BUXTON, J.; MACH, C. Psychrometric and ventilation constraints for vapor pressure deficit control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26. p. 343-359. 2000.
- ZOLNIER, S. Automação de sistemas de cultivo em substrato. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATO PARA PLANTAS, 4., 2004, Viçosa, MG. **Palestras...** Viçosa: UFV, 2004. p. 158-189.

# APÊNDICE

```

//Programa computacional para o controle de preparo e aplicação de soluções nutritivas - HIDROCONTROLE
//Desenvolvido pelo Engenheiro Agrícola Antonio José Steidle Neto
//Viçosa, 27 de junho de 2005
//Última atualização: 23 de outubro de 2006
//Plataforma de programação: C++ Builder (versão 5)
//Endereço Base da placa CYDAS 1602HR: 310Hex
//Placa CYEXP 32: Rg (canal 07) e RFA (canal 08)
//Placa CYDAS 1602HR: Tar_ext (canal 35), URext (canal 36), Tar_int (canal 37), URint (canal 38) e Var (canal 41)
//Configurações da placa CYEXP 32: differential, bipolar e ganho 200
//Configurações da placa CYDAS 1602HR: single ended (16 canais), bipolar e ganho 1 (+/-10 V)
//Os canais 32 e 33 são usados pela CYEXP 32 (para cada 16 canais da placa CYEXP perde-se 1 canal na placa CYDAS 1602HR)

//Bibliotecas
#include <vcl.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include "Principal.h"
#pragma hdrstop
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TFPrincipal *FPrincipal;
//-----
//Declaração das variáveis associadas ao ciclo do sistema automático
double CEdesejada, CEmcorr, CEmedia, Econtrole, CEagua, CEsolA, CEsolB, Vsol, Vagua, Qagua, dt_agua, DTagua, TempoAgua, Qsol,
dt_sol, DTsol, Qferti, dt_ferti, DTferti;
int menor, maior;
double Vsat, Vmin, Vrep, Vferti, Vtotal;
int Nplanta;

```

```

//Declaração das variáveis associadas à medição de condutividade elétrica e de temperatura das soluções nutritivas
unsigned char valor1, valor2, valor3, valor4;
double f1, f2, f3, f4, pulsos1=0, pulsos2=0, pulsos3=0, pulsos4=0, x1=0, x2=0, x3=0, x4=0, R=0, CEsol_auto=0, CEauto_acum,
Tsol_auto=0, CEsol_conv=0, Tsol_conv=0, NECE_conv=0, NECE_auto=0, NET_conv=0, NET_auto=0;
int dt, c, nmedidas, nleituras, CondiçãoEntrada=0;
AnsiString NomeArquivo, DataAcionamento, DataAnterior;
//Declaração da variável associada à verificação do nível de solução nutritiva no reservatório de preparo
unsigned char Nivel;
//Declaração das variáveis associadas à conversão A/D e ao cálculo dos fatores micrometeorológicos
unsigned char End_Canal;
unsigned long Dados_LSB, Dados_MSB;
long Status, Dados;
double Tensao, Tar_ext, URext, Tar_int, URint, Corrente_Var, Var, Rg, Corrente_RFA, RFA;
int Contador, i, j, k;
//Declaração das variáveis associadas à estimativa da evapotranspiração da cultura do tomateiro
double Boc, Bol, Rn, G, es, ea, DPVar, Patm, Dvapor, Dseco, Dar, cpar;
double Des, L, Kpsi, ra, rc, ETo, ETc, Kc, ETcv, ETacum;
//Declaração das variáveis associadas ao acionamento das bombas
int HoraAccionaConv=-1, StatusAuto;
//Declaração das variáveis associadas ao acionamento dos relés
int Auto=0x00, Conv=0x00;
//Declaração das variáveis associadas ao cálculo dos graus-dia
float Tar_acum, minGD, GD, GDacum;
//-----
__fastcall TFPrincipal::TFPrincipal(TComponent* Owner)
: TForm(Owner)
{}
//-----
//Funções para escrever e ler a partir da placa de entradas e saídas digitais (CYDIO 24H)
void outp(int iPort, int iDado)

```

```
{
  _DX=iPort;
  _AX=iDado;
  __emit__ (0xEE);
}
```

```
unsigned int inp(int iPort)
```

```
{
  _DX=iPort;
  __emit__ (0xEC);
  return (_AL);
}
```

```
//-----
```

```
//Procedimento para a medição de condutividade elétrica
```

```
void MedidaCE()
```

```
{dt=60; //Intervalo de tempo entre as medidas de condutividade elétrica [s]
```

```
FPrincipal->Tpulsos->Interval=dt*1000;
```

```
FPrincipal->Tpulsos->Enabled=true;
```

```
c=0; nmedidas=-1;
```

```
//Configuração das portas A, B e C da placa CYDIO 24H (CYDAS 1602HR): Base + 403Hex
```

```
outp(0x713,0x99); //Portas A e C configuradas como entrada e porta B como saída
```

```
//Observação: A porta C não será usada (alguns canais desta porta são energizados pela placa ERA-01)
```

```
//Procedimento para a medição de frequência
```

```
while (c==0)
```

```
{Application->ProcessMessages();
```

```
//Medida de condutividade elétrica do sistema automático
```

```
//Circuito de condutividade: Porta A (Base + 400Hex) pino 37
```

```
valor1=inp(0x710);
```

```
valor1=valor1 & 0x01;
```

```
if (valor1==1)
```

```

{x1=1;}
if (valor1==0 && x1==1)
{pulsos1=pulsos1+1;
 x1=0;}
//Circuito de temperatura: Porta A (Base + 400Hex) pino 36
valor2=inp(0x710);
valor2=valor2 & 0x02;
if (valor2==2)
{x2=1;}
if (valor2==0 && x2==1)
{pulsos2=pulsos2+1;
 x2=0;}

//Medida de condutividade elétrica do sistema convencional
//Circuito de condutividade: Porta A (Base + 400Hex) pino 34
valor3=inp(0x710);
valor3=valor3 & 0x08;
if (valor3==8)
{x3=1;}
if (valor3==0 && x3==1)
{pulsos3=pulsos3+1;
 x3=0;}
//Circuito de temperatura: Porta A (Base + 400Hex) pino 33
valor4=inp(0x710);
valor4=valor4 & 0x10;
if (valor4==16)
{x4=1;}
if (valor4==0 && x4==1)
{pulsos4=pulsos4+1;
 x4=0;}

```

```

} //Fim do while (c==0)
}
//-----
void Ciclo()
{
//Calcula Vsol (volume das soluções-estoque A e B), considerando: Vsol=VsolA=VsolB e Vagua=Vtotal [ml]
CEagua=0.0866; //Condutividade elétrica da água [dS/m]
CEsolA=72.01; //Condutividade elétrica da solução-estoque A (Fase C) [dS/m]
CEsolB=102.77; //Condutividade elétrica da solução-estoque B (Fase C) [dS/m]
Vsol=((CEcorr-CEagua)*Vtotal)/(CEsolA+CEsolB);
if (Vsol<0){Vsol=0;}
//Calcula Vagua (volume de água) [ml]
Vagua=Vtotal-(2*Vsol);
//Recalcula Vsol, considerando: Vsol=VsolA=VsolB e Vagua!=Vtotal [ml]
Vsol=((CEcorr*Vtotal)-(CEagua*Vagua))/(CEsolA+CEsolB);
if (Vsol<0){Vsol=0;}
//Calcula o tempo de acionamento das bombas de soluções-estoque A e B
Qsol=2.18; //Vazão das bombas de soluções-estoque A e B [ml/s]
dt_sol=Vsol/Qsol;
menor=floor(dt_sol);
maior=ceil(dt_sol);
if ((dt_sol-menor)<(maior-dt_sol)){DTsol=menor;}
else {DTsol=maior;}
//Calcula o tempo de acionamento da bomba de água
Qagua=64.96; //Vazão da bomba de água [ml/s]
dt_agua=Vagua/Qagua;
menor=floor(dt_agua);
maior=ceil(dt_agua);
if ((dt_agua-menor)<(maior-dt_agua)){DTagua=menor;}
else {DTagua=maior;}

```

```

//Calcula o tempo de acionamento da bomba de fertirrigação (sistema automático)
Qferti=0.35; //Vazão média das estacas gotejadoras do sistema automático [ml/s]
dt_ferti=(Vferti/Qferti);
menor=floor(dt_ferti);
maior=ceil(dt_ferti);
if ((dt_ferti-menor)<(maior-dt_ferti)){DTferti=menor;}
else {DTferti=maior;}
FPrincipal->Tautomatico->Interval=1;
FPrincipal->Tautomatico->Enabled=True;
StatusAuto=0;
}
//-----
//Procedimentos associados ao botão ACIONAR
void __fastcall TFPrincipal::BacionarClick(TObject *Sender)
{FPrincipal->TInicia->Enabled=false;
 OC1->CreateLinkToFile("Controle_Total.exe",true);
//Atualiza o componente Tree View
FPrincipal->TV->Items->Item[1]->Collapse(true);
FPrincipal->TV->Items->Item[7]->Collapse(true);
FPrincipal->TV->Items->Item[10]->Collapse(true);
FPrincipal->TV->Items->Item[16]->Text="Coeficiente da cultura (Kc)";
FPrincipal->TV->Items->Item[17]->Text="Transp. instantânea";
FPrincipal->TV->Items->Item[18]->Text="Transp. acumulada";
FPrincipal->TV->Items->Item[19]->Text="Graus-dia acumulado";
Contador=0;
ETacum=0;
TempoAgua=0;
FPrincipal->Trelogio->Enabled=true;
FPrincipal->Tplacas->Enabled=true;
FPrincipal->Tconvencional->Enabled=true;

```

```

//Cria um arquivo onde serão gravados os dados micrometeorológicos
TDateTime Data=Now();
FPrincipal->REdados_micro->Clear();
NomeArquivo=Data.FormatString("dd_mm_yy__hh_mm");
DataAcionamento=Data.FormatString("dd_mm_yy__hh_mm");
FPrincipal->REgraus_dia->Clear();
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->LoadFromFile("DataAnterior.txt");
DataAnterior=FPrincipal->REgraus_dia->Lines[0].Text.SubString(1,15);
FPrincipal->REgraus_dia->Clear();
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->LoadFromFile("GrausDia"+DataAnterior+".txt");
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->SaveToFile("GrausDia"+DataAcionamento+".txt");
FPrincipal->REgraus_dia->Clear();
FPrincipal->REgraus_dia_rel->Clear();
DataAnterior=DataAcionamento;
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Add(DataAnterior);
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->SaveToFile("DataAnterior.txt");
FPrincipal->REgraus_dia->Clear();
REdados_micro->Lines->Add("Data Horário Rglobal(interna) RFA(interna) Tar(externo) URar(externo) Tar(interno) URar(interno)
Var(interno) CE(auto) Tsol(auto) CECorr CE(conv) Tsol(conv) Kc Transp.Instantanea Transp.Acumulada");
REdados_micro->Lines->Add("- - W/m^2 microMol/m^2.s °C % °C % m/s dS/m °C dS/m dS/m °C - ml/min.planta ml/planta");
//Inicializa os valores utilizados no cálculo da CECorr
//Ordem dos dados no arquivo CECorr.txt: CEmedia, CECorr, CEauto_acum, nleituras
FPrincipal->REce->Lines->LoadFromFile("CEcorr.txt");
CEmedia=StrToFloat(FPrincipal->REce->Lines->Strings[0]);
CEcorr=StrToFloat(FPrincipal->REce->Lines->Strings[1]);
CEauto_acum=StrToFloat(FPrincipal->REce->Lines->Strings[2]);
nleituras=StrToInt(FPrincipal->REce->Lines->Strings[3]);
FPrincipal->REce->Clear();
FPrincipal->Lcorr->Caption="+FloatToStrF(CEcorr,ffFixed,5,2)+" dS/m";

```

```

//Aciona a animação das plantas de tomate
Aplanta->Visible=true;
Aplanta->FileName="Plantas.avi";
Aplanta->Active=true;
//Volume mínimo preestabelecido de solução nutritiva no vaso de cultivo (75% do volume de saturação) (Vmin)
//Unidade: ml
Vsat=136.37; //Volume de solução nutritiva suficiente para saturar 1 L de areia na altura média de 17 cm (10% de água) [ml]
Vmin=0.75*Vsat;
//Volume de reposição de solução nutritiva por planta em cada evento de fertirrigação para reestabelecer a saturação (Vrep)
//Unidade: ml/planta
Vrep=Vsat-Vmin;
//Volume de solução nutritiva por planta a ser repostado, considerando um excesso de 20% para permitir a medição de condutividade
elétrica (Vferti)
//Unidade: ml/planta
Vferti=1.2*Vrep;
//Volume de solução nutritiva necessário em cada fertirrigação (Vtotal)
//Unidade: ml
Nplanta=32; //Número total de plantas de tomate referentes ao sistema automático
Vtotal=Vferti*Nplanta;
MedidaCE();
}
//-----
//Procedimentos associados ao botão PARAR
void __fastcall TFPrincipal::BpararClick(TObject *Sender)
{
Trelogio->Enabled=false;
Tpulsos->Enabled=false;
Tplacas->Enabled=false;
Tautomatico->Enabled=false;
Tconvencional->Enabled=false;

```

```

ETacum=0;
c=1;
//Desliga todas as bombas: Porta B (Base + 401Hex) pinos 10 a 03
outp(0x711,0x00);
Aplanta->Visible=false;
Aplanta->Active=false;
FPrincipal->AsolA->Visible=false;
FPrincipal->AsolB->Visible=false;
FPrincipal->AsolA->Active=false;
FPrincipal->AsolB->Active=false;
FPrincipal->Aagua->Visible=false;
FPrincipal->Aagua->Active=false;
FPrincipal->Airriga->Visible=false;
FPrincipal->Airriga->Active=false;
ShowMessage("Sistema de controle desligado.");
}
//-----
void CYEXP()
{
//Procedimentos associados à aquisição de dados micrometeorológicos
Contador++;
FPrincipal->REdados_micro->Lines->Add(DateToStr(Now())+" "+TimeToStr(Now()));
//Acessa os canais das placas CYEXP 32 e CYDAS 1602HR
for (j=0;j<7;j++)
{switch (j)
{case 0: End_Canal=0x07;break; //Canal 07 - CYEXP 32
case 1: End_Canal=0x08;break; //Canal 08 - CYEXP 32
case 2: End_Canal=0x23;break; //Canal 35 - CYDAS 1602HR
case 3: End_Canal=0x24;break; //Canal 36 - CYDAS 1602HR
case 4: End_Canal=0x25;break; //Canal 37 - CYDAS 1602HR

```

```

case 5: End_Canal=0x26;break; //Canal 38 - CYDAS 1602HR
case 6: End_Canal=0x29;break; //Canal 41 - CYDAS 1602HR
}
Tensao=0;
outp(0x31B,0x00); //Seleciona o ganho 1 (código 0) da placa CYDAS 1602HR
for (i=0;i<6;i++) //Realiza 6 leituras
{if(j>=0 && j<2)
{outp(0x312,0x00); //Seleciona a CYEXP32 (1)
  outp(0x313,End_Canal);} //Seleciona o canal para a conversão analógica/digital
else
{outp(0x312,End_Canal);} //Seleciona o canal para a conversão analógica/digital
for(k=0; k<30; k++) //Intervalo de tempo entre procedimentos
{StrToInt('0x00');}
outp(0x310,0x00); //Inicia a conversão analógica/digital
do
Status=inp(0x318);
while((Status & 0x80)==0x80);
//Combina o byte do endereço 310Hex(LSB) com o byte do endereço 311Hex(MSB)
Dados_LSB=inp(0x310);
Dados_LSB=Dados_LSB & 0x000000FF;
Dados_MSB=inp(0x311);
Dados_MSB=Dados_MSB << 8 & 0x0000FF00; //Desloca o byte do endereço 311Hex(MSB) 8 posições
Dados=Dados_MSB+Dados_LSB;
//Converte o valor atribuído a variável "Dados" em tensão
Dados=(double)Dados-32768.0; //Modo bipolar
if(i>0)
{if (j>=0 && j<2)
{Tensao=Tensao+1000.0*((Dados*20.0)/(200.0*65536.0));} //Faixa = 20(-10 a +10V) e Ganho = 200 // unidade: miliVolts
else
{Tensao=Tensao+((Dados*20.0)/(1.0*65536.0));} //Faixa = 20(-10 a +10V) e Ganho = 1 // unidade: Volts
}
}
}

```

```

} //Fim do if i
} //Fim do for i
Tensao=Tensao/5.0;
if (j==2)
{Tar_ext=-40.0+100.0*Tensao;
FPrincipal->TV->Items->Item[j]->Text="Tar (externo): "+FloatToStrF(Tar_ext,ffFixed,4,1)+" °C";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(Tar_ext,ffFixed,4,1);
} //Fim do if j==2
else if (j==3)
{URext=100.0*Tensao;
if (URext<0){URext=0;}
if (URext>100){URext=100;}
FPrincipal->TV->Items->Item[j]->Text="URar (externo): "+FloatToStrF(URext,ffFixed,4,1)+" %";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(URext,ffFixed,4,1);
} //Fim do else if j==3
else if (j==4)
{Tar_int=-40.0+100.0*Tensao;

//Procedimentos associados ao cálculo dos graus-dia
//Ordem dos dados no arquivo GrausDia.txt: Tar_acum, minGD, GD, GDacum
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Clear();
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->LoadFromFile("GrausDia"+DataAcionamento+".txt");
Tar_acum=StrToFloat(FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Strings[0])+Tar_int;
minGD=StrToFloat(FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Strings[1])+1;
GD=StrToFloat(FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Strings[2]);
GDacum=StrToFloat(FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Strings[3]);
FPrincipal->TV->Items->Item[19]->Text="Graus-dia acumulado: "+FloatToStrF(GDacum,ffFixed,4,1)+" °C";
if (minGD==1440)
{GD=Tar_acum/minGD-10.0; //Temperatura base da cultura do tomateiro = 10°C
Tar_acum=0;

```

```

    minGD=0;
//Acumula diariamente o valor dos graus-dia para o cálculo do coeficiente da cultura (Kc)
    GDacum=GDacum+GD;
    FPrincipal->REgraus_dia_rel->Lines->Add(DateToStr(Now())+" "+FloatToStr(GD)+" "+FloatToStr(GDacum));
    FILE *Arq;
    String Nome="GrausDiaRel"+DataAcionamento+".txt";
    Arq=fopen(Nome.c_str(),"a");
    fprintf(Arq,FPrincipal->REgraus_dia_rel->Lines[0].GetText());
    fclose(Arq);
} //Fim do if minGD==1440

//Procedimentos associados ao cálculo da condutividade elétrica da solução nutritiva a ser preparada pelo sistema automático
//Acumula o valor de CEsol_auto para o cálculo da CEmedia
    nleituras++;
    CEauto_acum=CEauto_acum+CEsol_auto;
    if (nleituras==1440)
    {CEmedia=CEauto_acum/nleituras;
    nleituras=0;
    CEauto_acum=0;
//Calcula a condutividade elétrica corrigida com base na condutividade média do dia anterior [dS/m]
    CEdesejada=3.0;
    if (CEmedia>(CEdesejada+0.1)){Econtrole=-0.03;}
    else if (CEmedia<(CEdesejada-0.1)){Econtrole=0.03;}
    else
    {Econtrole=0.0;}
    CEcorr=CEcorr+Econtrole;
    FPrincipal->Lcorr->Caption="CE corrigida: "+FloatToStrF(CEcorr,ffFixed,5,2)+" dS/m";
    }
    FPrincipal->REce->Lines->Add(FloatToStrF(CEmedia,ffFixed,3,2));
    FPrincipal->REce->Lines->Add(FloatToStrF(CEcorr,ffFixed,3,2));

```

```

FPrincipal->REce->Lines->Add(FloatToStrF(CEauto_acum,ffFixed,3,2));
FPrincipal->REce->Lines->Add(IntToStr(nleituras));
FPrincipal->REce->Lines->SaveToFile("CEcorr.txt");
FPrincipal->REce->Lines->Clear();

FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Clear();
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Add(FloatToStrF(Tar_acum,ffFixed,6,0));
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Add(FloatToStrF(minGD,ffFixed,6,0));
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Add(FloatToStrF(GD,ffFixed,6,0));
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->Add(FloatToStrF(GDacum,ffFixed,6,0));
FPrincipal->REgraus_dia->Lines->SaveToFile("GrausDia"+DataAcionamento+".txt");
FPrincipal->TV->Items->Item[j]->Text="Tar (interno): "+FloatToStrF(Tar_int,ffFixed,4,1)+" °C";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(Tar_int,ffFixed,4,1);
} //Fim do else if j==4
else if (j==5)
{URint=100.0*Tensao;
if (URint<0){URint=0;}
if (URint>100){URint=100;}
FPrincipal->TV->Items->Item[j]->Text="URar (interno): "+FloatToStrF(URint,ffFixed,4,1)+" %";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(URint,ffFixed,4,1);
} //Fim do else if j==5
else if (j==6)
{Corrente_Var=(1000.0*Tensao)/175.0; //Resistor < 400 ohms
Var=0.3143*Corrente_Var-1.2065;
if (Var<0){Var=0;}
FPrincipal->TV->Items->Item[j]->Text="Var (interno): "+FloatToStrF(Var,ffFixed,4,2)+" m/s";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(Var,ffFixed,4,2);
} //Fim do else if j==6
else if (j==0)
{Rg=Tensao/((20.89*pow(10.0,-6.0))*1000.0); //Constante de calibração do sensor (Kipp & Zonen): 20,89 x 10^-6 V/W/m^2

```

```

if (Rg<0){Rg=0;}
FPrincipal->TV->Items->Item[j+8]->Text="Rglobal (interna): "+FloatToStrF(Rg,ffFixed,6,2)+" W/m^2";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(Rg,ffFixed,6,2);
} //Fim do if j==0
else if (j==1)
{Corrente_RFA=-1.0*(Tensao/604.0)*1000.0; //Resistor = 604 ohms
RFA=(Corrente_RFA*1000.0)/7.22; //Constante de calibração do sensor (LI-COR): 7,22 x 10^-6 A/1000 microMol/m^2.s
if (RFA<0){RFA=0;}
FPrincipal->TV->Items->Item[j+8]->Text="RFA (interna): "+FloatToStrF(RFA,ffFixed,6,2)+" microMol/m^2.s";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(RFA,ffFixed,6,2);
} //Fim do else if j==1
} //Fim do for j
//-----
//Procedimentos associados à estimativa da evapotranspiração da cultura de referência (ETo)
//Balanço de ondas curtas (Boc)
//Unidade: W/m^2
//Consideração: albedo da cultura de referência (grama) = 0,23
Boc=Rg*(1.0-0.23);
//Balanço de ondas longas (Bol)
//Unidade: W/m^2
Bol=(0.85*0.80*(5.6697*pow(10.0,-8.0)))*((pow((Tar_int+273.15),4.0))-(0.86*pow((Tar_ext+273.15),4.0)));
//Saldo de radiação (Rn)
//Unidade: W/m^2
Rn=Boc+Bol;
//Fluxo de calor no substrato (G)
//Unidade: W/m^2
if (Rn>0){G=0.1*Rn;}
else {G=0.5*Rn;}
//Pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar interno (es)
//Unidade: hPa

```

```

es=6.1078*pow(10.0,(7.5*Tar_int)/(237.3+Tar_int));
//Pressão real do vapor d'água à temperatura do ar interno (ea)
//Unidade: hPa
ea=(URint*es)/100.0;
//Déficit de pressão do vapor d'água no ar (DPVar)
//Unidade: Pa
DPVar=100.0*(es-ea);
//Pressão atmosférica local (Patm)
//Unidade: hPa
//Consideração: altitude média de Viçosa (MG) = 670 m
Patm=1013.0*pow((293.0-0.0065*670.0)/293.0,5.26);
//Densidade absoluta do vapor d'água (Dvapor)
//Unidade: g_vapor/m^3ar
Dvapor=(216.68*ea)/(Tar_int+273.15);
//Densidade absoluta do ar seco (Dseco)
//Unidade: gar_seco/m^3ar
Dseco=(348.37*(Patm-ea))/(Tar_int+273.15);
//Densidade absoluta do ar (Dar)
//Unidade: kg_ar/m^3ar
Dar=(Dvapor+Dseco)/1000.0;
//Calor específico do ar à pressão constante (cpar)
//Unidade: J/kg.°C
cpar=1007.0;
//Inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água em relação à temperatura do ar (Des)
//Unidade: Pa/°C
Des=100.0*(6.1078*pow(10.0,(7.5*Tar_int)/(237.3+Tar_int))*log(10)*(1779.75/pow(237.3+Tar_int,2.0)));
//Calor latente de evaporação da água (L)
//Unidade: J/kg_água_evaporada
L=(2.5*pow(10.0,6.0))-(2370.0*Tar_int);

```

```

//Coeficiente psicrométrico (Kpsi)
//Unidade: Pa/°C
Kpsi=(cpar*Patm*100.0)/(0.62198*L);
//Resistência aerodinâmica (ra)
//Unidade: s/m
ra=(280.0*Kpsi)/(Des+Kpsi);
//Resistência da superfície da cultura (rc)
//Unidade: s/m
rc=70.0;
//Evapotranspiração da cultura de referência (ETo)
//Unidade: W/m^2
ETo=((Des*(Rn-G))+(Dar*cpar*(DPVar/ra)))/(Des+Kpsi*(1+(rc/ra)));

//Procedimento associado à estimativa do coeficiente da cultura do tomateiro (Kc)
//Unidade: adimensional
if (GDacum==0){Kc=0.09;}
else {Kc=0.9219/(1+exp(-(GDacum-181.5423)/81.8125));}

//Procedimentos associados à estimativa da evapotranspiração da cultura do tomateiro (ETc)
//Unidade: W/m^2
ETc=Kc*ETo;
//Evapotranspiração da cultura do tomateiro (ETcv)
//Unidade: ml/min.planta
//Observações: densidade de plantio = 2 plantas/m^2
//          1 W = 1 J/s; 1 kg = 1 L = 1000 ml
//          transpiração estimada em escala de minuto (60 segundos)
ETcv=60.0*(ETc*1000.0)/(2.0*L);
//Armazena os valores de CE e Tsol (automático e convencional) no REdados_micro
int Fim_Str=FPPrincipal->TV->Items->Item[11]->Text.AnsiPos(" dS");

```

```

FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FPrincipal->TV->Items->Item[11]-
>Text.SubString(18,Fim_Str-18);
Fim_Str=FPrincipal->TV->Items->Item[12]->Text.AnsiPos(" °C");
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FPrincipal->TV->Items->Item[12]-
>Text.SubString(20,Fim_Str-20);
Fim_Str=FPrincipal->TV->Items->Item[14]->Text.AnsiPos(" dS");
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FPrincipal->TV->Items->Item[14]-
>Text.SubString(19,Fim_Str-19);
Fim_Str=FPrincipal->TV->Items->Item[15]->Text.AnsiPos(" °C");
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FPrincipal->TV->Items->Item[15]-
>Text.SubString(21,Fim_Str-21);
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(CEcorr,ffFixed,4,2);
//Armazena os valores de Kc e de transpiração no REdados_micro
FPrincipal->TV->Items->Item[16]->Text="Coeficiente da cultura (Kc): "+FloatToStrF(Kc,ffFixed,4,2);
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(Kc,ffFixed,4,2);
FPrincipal->TV->Items->Item[17]->Text="Transp. instantânea: "+FloatToStrF(ETcv,ffFixed,6,3)+" ml/min.planta";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(ETcv,ffFixed,6,3);
//Evapotranspiração acumulada da cultura do tomateiro (ETacum)
//Unidade: ml/planta
ETacum=ETacum+ETcv;
FPrincipal->TV->Items->Item[18]->Text="Transp. acumulada: "+FloatToStrF(ETacum,ffFixed,6,3)+" ml/planta";
FPrincipal->REdados_micro->Text=FPrincipal->REdados_micro->Text+" "+FloatToStrF(ETacum,ffFixed,6,3);

//Atualiza o componente Tree View
FPrincipal->TV->Items->Item[1]->Expand(true);
FPrincipal->TV->Items->Item[7]->Expand(true);
FPrincipal->TV->Items->Item[10]->Expand(true);
FPrincipal->REdados_micro->Lines->SaveToFile(NomeArquivo+".txt");
}
//-----

```

```

void __fastcall TFPrincipal::TpulsosTimer(TObject *Sender)
{Tpulsos->Enabled=false;
 f1=(pulsos1)/dt;
 f2=(pulsos2)/dt;
 f3=(pulsos3)/dt;
 f4=(pulsos4)/dt;
 nmedidas++;
//Calcula a resistência, condutividade elétrica e temperatura (sistema automático)
 if (nmedidas>=1)
//Circuito de condutividade elétrica
//1ª Regressão: 10.15dS/m >= CE > 2.15dS/m
 {if ((f1<=1471.5) && (f1>776.2))
  {R=(1983.2456-f1)/(f1*0.003791-0.3122);
   CEsol_auto=1/R*1000; NECE_auto=0;
  }
//2ª Regressão: 2.15dS/m >= CE >= 0.10dS/m
 else if ((f1<=776.2) && (f1>=53.4))
  {R=(2041.3492-f1)/(f1*0.003464+0.02227);
   CEsol_auto=1/R*1000; NECE_auto=0;
  }
 else
  {NECE_auto++;
   int Fim_Str=FPPrincipal->TV->Items->Item[11]->Text.AnsiPos(" dS");
   CEsol_auto=StrToFloat(FPrincipal->TV->Items->Item[11]->Text.SubString(18,Fim_Str-18));
  }
//Circuito de temperatura
//Regressão termistor (10.000 ohms): 10°C <= Temp <= 40°C
 if ((f2<=412.29) && (f2>=129.10))
  {R=(5818.3298-f2)/(f2*0.002313+0.003007);
   Tsol_auto=(1/(1/3602.4251*log(R/9974.104894759)+1/298.16))-273.16; NET_auto=0;
  }
}

```

```

FPrincipal->TV->Items->Item[12]->Text="Tsol (automático): "+FloatToStrF(Tsol_auto,ffFixed,4,1)+" °C";
//Correção da condutividade elétrica para a temperatura padrão (25°C)
if ((Tsol_auto<=35.0) && (Tsol_auto>=15.0))
{CEsol_auto=CEsol_auto/(0.017092*Tsol_auto+0.5727);}
}
else
{NET_auto++;
int Fim_Str=FPrincipal->TV->Items->Item[12]->Text.AnsiPos(" °C");
Tsol_auto=StrToFloat(FPrincipal->TV->Items->Item[12]->Text.SubString(20,Fim_Str-20));
}
FPrincipal->TV->Items->Item[11]->Text="CE (automático): "+FloatToStrF(CEsol_auto,ffFixed,6,2)+" dS/m";

//Calcula a resistência, condutividade elétrica e temperatura (sistema convencional)
//Circuito de condutividade elétrica
//1ª Regressão: 10.15dS/m >= CE > 2.15dS/m
if ((f3<=1471.5) && (f3>776.2))
{R=(1983.2456-f3)/(f3*0.003791-0.3122);
CEsol_conv=1/R*1000; NECE_conv=0;
}
//2ª Regressão: 2.15dS/m >= CE >= 0.10dS/m
else if ((f3<=776.2) && (f3>=53.4))
{R=(2041.3492-f3)/(f3*0.003464+0.02227);
CEsol_conv=1/R*1000; NECE_conv=0;
}
else
{NECE_conv++;
int Fim_Str=FPrincipal->TV->Items->Item[14]->Text.AnsiPos(" dS");
CEsol_conv=StrToFloat(FPrincipal->TV->Items->Item[14]->Text.SubString(19,Fim_Str-19));
}

```

```

//Circuito de temperatura
//Regressão termistor (10.000 ohms): 10°C <= Temp <= 40°C
if ((f4<=412.29) && (f4>=129.10))
{R=(5818.3298-f4)/(f4*0.002313+0.003007);
Tsol_conv=(1/(1/3602.4251*log(R/9974.104894759)+1/298.16))-273.16; NET_conv=0;
FPrincipal->TV->Items->Item[15]->Text="Tsol (convencional): "+FloatToStrF(Tsol_conv,ffFixed,4,1)+" °C";
//Correção da condutividade elétrica para a temperatura padrão (25°C)
if ((Tsol_conv<=35.0) && (Tsol_conv>=15.0))
{CEsol_conv=CEsol_conv/(0.017092*Tsol_conv+0.5727);}
}
else
{NET_conv++;
int Fim_Str=FPrincipal->TV->Items->Item[15]->Text.AnsiPos(" °C");
Tsol_conv=StrToFloat(FPrincipal->TV->Items->Item[15]->Text.SubString(21,Fim_Str-21));
}
FPrincipal->TV->Items->Item[14]->Text="CE (convencional): "+FloatToStrF(CEsol_conv,ffFixed,6,2)+" dS/m";
if (((NECE_auto>3)||((NECE_auto>3)||((NET_conv>3)||((NET_auto>3)) && ((Auto|Conv)==0x00))
{c=1;
Trelógio->Enabled=false;
Tpulsos->Enabled=false;
Tplacas->Enabled=false;
Tautomatico->Enabled=false;
Tconvencional->Enabled=false;
OC1->DoVerb(ovShow);
Application->Terminate();}

//Condição para que o procedimento de cálculo dos volumes a serem adicionados no reservatório de preparo seja iniciado
else if (ETacum>=Vrep)
{ETacum=0;
Ciclo();}

```

```

} //Fim do if (nmedidas>=1)
if ((Tautomatico->Enabled==false) && (c==0))
{pulsos1=0;
pulsos2=0;
pulsos3=0;
pulsos4=0;
Tpulsos->Enabled=true;
FPrincipal->Update();
} //Fim if Tautomatico->Enabled==false
}
//-----
//Procedimentos associados ao botão SAIR
void __fastcall TFPrincipal::BsairClick(TObject *Sender)
{
Trelogio->Enabled=false;
Tpulsos->Enabled=false;
Tplacas->Enabled=false;
Tconvencional->Enabled=false;
Tautomatico->Enabled=false;
c=1;
//Desliga todas as bombas: Porta B (Base + 401Hex) pinos 10 a 03
outp(0x711,0x00);
Close();
}
//-----
void __fastcall TFPrincipal::TrelogioTimer(TObject *Sender)
{TV->Items->Item[0]->Text="Horário: "+TimeToStr(Time());
if ((Tautomatico->Enabled) && ((FPrincipal->AsolA->Active) || (FPrincipal->Aagua->Active)))
//Procedimento para verificar o nível de solução nutritiva no reservatório de preparo enquanto são adicionadas soluções-estoque A, B e
água: Porta A (Base + 400Hex) pino 35

```

```

{Nivel=inp(0x710);
 Nivel=Nivel & 0x04;
 if (Nivel!=4)
 {FPrincipal->TV->Items->Item[13]->Text="Nível tanque: Baixo";
  if (FPrincipal->Aagua->Active) {TempoAgua=TempoAgua+1;}}
 else
 {FPrincipal->TV->Items->Item[13]->Text="Nível tanque: Alto";
  if (FPrincipal->AsolA->Active)
  {FPrincipal->AsolA->Visible=false;
   FPrincipal->AsolB->Visible=false;
   FPrincipal->AsolA->Active=false;
   FPrincipal->AsolB->Active=false;
   FPrincipal->Update();
  }
  else if (FPrincipal->Aagua->Active)
  {FPrincipal->Aagua->Visible=false;
   FPrincipal->Aagua->Active=false;
   FPrincipal->Update();
  }
  StatusAuto=2;
  Tautomatico->Interval=500;
 } //Fim do else
 } //Fim do if ((Tautomatico->Enabled) && ((StatusAuto==0) || (StatusAuto==1)))
 }
 //-----
void __fastcall TFPrincipal::TplacasTimer(TObject *Sender)
{CYEXP();
 //Salva os dados micrometeorológicos, criando um novo arquivo a cada 24 horas (1.440 minutos)
 if (Contador>1440)
 {Contador=0;

```

```

TDateTime Data=Now();
FPrincipal->REdados_micro->Clear();
NomeArquivo=Data.FormatString("dd_mm_yy__hh_mm");
FPrincipal->REbombas_auto->Clear();
FPrincipal->REbombas_conv->Clear();
REdados_micro->Lines->Add("Data Horario Rglobal(interna) RFA(interna) Tar(externo) URar(externo) Tar(interno) URar(interno)
Var(interno) CE(auto) Tsol(auto) CECorr CE(conv) Tsol(conv) Kc Transp.Instantanea Transp.Acumulada");
REdados_micro->Lines->Add("- - W/m^2 microMol/m^2.s °C % °C % m/s dS/m °C dS/m dS/m °C - ml/min.planta ml/planta");
} //Fim do if (Contador>1440)
}
//-----
void __fastcall TFPrincipal::TconvencionalTimer(TObject *Sender)
{
//Procedimentos associados ao acionamento da bomba de fertirrigação do sistema convencional: Porta B (Base + 401Hex) pino 07
Word Hora, Minuto, Segundo, MSegundo;
DecodeTime(Now(), Hora, Minuto, Segundo, MSegundo);
//Aciona a bomba de fertirrigação por 100 segundos às 24:00 horas
if (((Hora==24) || (Hora==0)) && (HoraAcionaConv<0))
{Conv=0x08;
outp(0x711,Auto|Conv);
REbombas_conv->Lines->Add(TimeToStr(Now())+" "+IntToStr(100));
LConv->Caption="Sistema Convencional: "+TimeToStr(Now());
Tconvencional->Interval=100000;
HoraAcionaConv=Hora;
}
//Desliga a bomba de fertirrigação das 24:00 às 7:00 horas
else if (((HoraAcionaConv==24) || (HoraAcionaConv==0)))
{Conv=0x00;
outp(0x711,Auto|Conv);
Tconvencional->Interval=1800000;
}
}

```

```

    HoraAccionaConv=-1;
}
//Aciona a bomba de fertirrigação por 100 segundos entre 7:00 e 10:00 horas
else if (((Hora>=7) && (Hora<10)) && (HoraAccionaConv<0))
{Conv=0x08;
  outp(0x711,Auto|Conv);
  REbombas_conv->Lines->Add(TimeToStr(Now())+" "+IntToStr(100));
  LConv->Caption="Sistema Convencional: "+TimeToStr(Now());
  Tconvencional->Interval=100000;
  HoraAccionaConv=Hora;
}
//Desliga a bomba de fertirrigação por 30 minutos entre 7:00 e 10:00 horas
else if (((HoraAccionaConv>=7) && (HoraAccionaConv<10)))
{Conv=0x00;
  outp(0x711,Auto|Conv);
  Tconvencional->Interval=1800000;
  HoraAccionaConv=-1;
}
//Aciona a bomba de fertirrigação por 100 segundos entre 10:00 e 16:00 horas
else if (((Hora>=10) && (Hora<16)) && (HoraAccionaConv<0))
{Conv=0x08;
  outp(0x711,Auto|Conv);
  REbombas_conv->Lines->Add(TimeToStr(Now())+" "+IntToStr(100));
  LConv->Caption="Sistema Convencional: "+TimeToStr(Now());
  Tconvencional->Interval=100000;
  HoraAccionaConv=Hora;
}
//Desliga a bomba de fertirrigação por 10 minutos entre 10:00 e 16:00 horas
else if (((HoraAccionaConv>=10) && (HoraAccionaConv<16)))
{Conv=0x00;

```

```

outp(0x711,Auto|Conv);
Tconvencional->Interval=600000;
HoraAcionaConv=-1;
}
//Aciona a bomba de fertirrigação por 100 segundos entre 16:00 e 19:00 horas
else if (((Hora>=16) && (Hora<19)) && (HoraAcionaConv<0))
{Conv=0x08;
outp(0x711,Auto|Conv);
REbomas_conv->Lines->Add(TimeToStr(Now())+" "+IntToStr(100));
LConv->Caption="Sistema Convencional: "+TimeToStr(Now());
Tconvencional->Interval=100000;
HoraAcionaConv=Hora;
}
//Desliga a bomba de fertirrigação por 30 minutos entre 16:00 e 19:00 horas
else if (((HoraAcionaConv>=16) && (HoraAcionaConv<19)))
{Conv=0x00;
outp(0x711,Auto|Conv);
Tconvencional->Interval=1800000;
HoraAcionaConv=-1;
}
//Desliga a bomba de fertirrigação das 19:00 às 24:00 horas
else Tconvencional->Interval=1800000;
REbomas_conv->Lines->SaveToFile("Bombas_Conv"+NomeArquivo+".txt");
}
//-----
void __fastcall TFPrincipal::TautomaticoTimer(TObject *Sender)
{if ((StatusAuto==0) && (DTsol>0))
//Aciona as bombas de soluções-estoque A e B: Porta B (Base + 401Hex) pino 10
{Tautomatico->Interval=(DTsol*1000);
StatusAuto=1;
}
}

```

```

Auto=0x01;
outp(0x711,Auto|Conv);
FPrincipal->AsolA->Visible=true;
FPrincipal->AsolB->Visible=true;
FPrincipal->AsolA->FileName="BombaBaixo.avi";
FPrincipal->AsolB->FileName="BombaBaixo.avi";
FPrincipal->AsolA->Active=true;
FPrincipal->AsolB->Active=true;
FPrincipal->Update();
} //Fim do if ((StatusAuto==0) && (DTsol>0))
else if ((StatusAuto==0) && (DTsol==0))
{Tautomatico->Interval=1;
  StatusAuto=1;}
else if (StatusAuto==1)
//Desliga as bombas de soluções-estoque A e B

//Aciona a bomba de água: Porta B (Base + 401Hex) pino 09
{Tautomatico->Interval=100000;
  StatusAuto=2;
  Auto=0x02;
  outp(0x711,Auto|Conv);
  FPrincipal->AsolA->Visible=false;
  FPrincipal->AsolB->Visible=false;
  FPrincipal->AsolA->Active=false;
  FPrincipal->AsolB->Active=false;
  FPrincipal->Aagua->Visible=true;
  FPrincipal->Aagua->FileName="BombaBaixo.avi";
  FPrincipal->Aagua->Active=true;
  FPrincipal->Update();
} //Fim do else if (StatusAuto==1)

```

```

else if (StatusAuto==2)
//Desliga a bomba de água

//Aciona a bomba de fertirrigação do sistema automático: Porta B (Base + 401Hex) pino 08
{Tautomatico->Interval=(DTferti*1000);
StatusAuto=3;
Auto=0x04;
outp(0x711,Auto|Conv);
FPrincipal->Aagua->Visible=false;
FPrincipal->Aagua->Active=false;
FPrincipal->Airriga->Visible=true;
FPrincipal->Airriga->FileName="BombaDireita.avi";
FPrincipal->Airriga->Active=true;
FPrincipal->Update();
} //Fim do else if (StatusAuto==2)
else if (StatusAuto==3)
//Desliga a bomba de fertirrigação do sistema automático

{Tautomatico->Enabled=false;
Status=0;
Auto=0x00;
outp(0x711,Auto|Conv);
FPrincipal->Airriga->Visible=false;
FPrincipal->Airriga->Active=false;
REbombas_auto->Lines->Add(TimeToStr(Now())+" "+FloatToStr(DTsol)+" "+FloatToStr(TempoAgua)+" "+FloatToStr(DTferti));
LAuto->Caption="Sistema Automático: "+TimeToStr(Now());
REbombas_auto->Lines->SaveToFile("Bombas_Auto"+NomeArquivo+".txt");
TempoAgua=0;
FPrincipal->TV->Items->Item[13]->Text="Nível tanque: ";
pulsos1=0;

```

```
pulsos2=0;
pulsos3=0;
pulsos4=0;
Tpulsos->Enabled=true;
FPrincipal->Update();
} //Fim do else if (StatusAuto==3)
}
//-----
```