



**MAYCON DIEGO RIBEIRO**

**PROJETO DE UMA MESA DE SUBIRRIGAÇÃO PARA  
AMBIENTES PROTEGIDOS**

**CAMPINAS**

**2013**





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MAYCON DIEGO RIBEIRO**

**PROJETO DE UMA MESA DE SUBIRRIGAÇÃO PARA  
AMBIENTES PROTEGIDOS**

**Orientador: Roberto Testezlaf**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração em Água e Solo.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO MAYCON DIEGO RIBEIRO ORIENTADO PELO PROF. DR. ROBERTO TESTEZLAF.

Assinatura do Orientador

A handwritten signature in black ink, reading "Roberto Testezlaf", is written over a horizontal line.

**CAMPINAS  
2013**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R354p Ribeiro, Maycon Diego, 1988-  
Projeto de uma mesa de subirrigação para ambientes protegidos / Maycon  
Diego Ribeiro. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Roberto Testezlaf.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Agrícola.

1. Engenharia de irrigação. 2. Irrigação agrícola. 3. Manejo da irrigação. 4.  
Águas residuais de irrigação. 5. Água de irrigação. I. Testezlaf, Roberto, 1956-. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.  
Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em inglês:** Design of greenhouse subirrigation bench

**Palavras-chave em inglês:**

Irrigation engineering

Irrigation farming

Irrigation scheduling

Sewage irrigation

Irrigation water

**Área de concentração:** Água e Solo

**Titulação:** Mestre em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Roberto Testezlaf [Orientador]

João Carlos Cury Saad

Antonio Carlos de Oliveira Ferraz

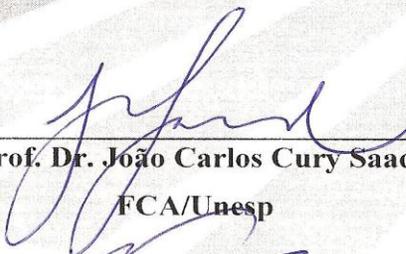
**Data de defesa:** 25-02-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Maycon Diego Ribeiro**, aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de fevereiro de 2013, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Prof. Dr. Roberto Testezlaf – Presidente e Orientador**  
**Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. João Carlos Cury Saad**  
**FCA/Unesp**



**Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz – Membro Titular**  
**Feagri/Unicamp**

Faculdade de Engenharia Agrícola  
Unicamp

Dedico aos meus pais Milton e Terezinha, à minha irmã Luana e aos meus tios Nilton e Terezinha pelo apoio e incentivo; aos meus avós Benedito e Ordalina pelo exemplo de pessoas que me inspiram para a busca dos meus objetivos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pela saúde que me permitem ir à busca de meus objetivos.

Ao professor Roberto Testezlaf pela orientação assídua, buscando me capacitar da melhor forma, para me tornar um profissional bem preparado. Agradeço também pelo apoio pessoal e moral nas minhas atividades diárias, pelas críticas construtivas e correções no sentido provocativo e interrogativo instigando-me a evoluir.

Agradeço aos professores Edson Eiji Matsura e Antonio Carlos de Oliveira Ferraz pelas sugestões apresentadas para melhoria dessa dissertação. Ao professor Julio Soriano que me auxiliou na realização de simulações estruturais.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos que viabilizou minha permanência para a realização do trabalho, assim como pela aprovação do projeto 479.665/2009-5, que auxiliou no financiamento da pesquisa.

À Faculdade de Engenharia Agrícola pela estrutura e ensinamentos que viabilizaram a pesquisa durante esses dois anos de mestrado.

À UNICAMP pela concessão das bolsas de transporte e alimentação, que possibilitaram a minha estadia em Campinas, durante a realização do meu treinamento.

À Gabriela Kurokawa e Silva que esteve do meu lado durante os dois anos de mestrado, me apoiando e incentivando todo o tempo, além de ajudar efetivamente na coleta de dados e na redação da minha dissertação.

Aos meus amigos Fabio P. de Deus, Marcio Mesquita, Rhuanito S. Ferrarezi, Antonio C. Ferreira Filho, Natalia Florez, Daniel C. Feitosa, Eduardo Agnelos, Ivo Zution, Leonardo Nazário, Aline Nazário, Allan Charlles M. de Souza, Marcelo da Silva, Guilherme Castioni, Tulio Ribeiro e Gelson Espindola da Silva, que me apoiaram e auxiliaram quando precisei no período da dissertação.

A minha família, meus pais Milton Ribeiro e Terezinha Ribeiro, minha irmã Luana Ribeiro, meus avós Benedito e Ordalina Ribeiro, meus tios Ari Tironi, Terezinha Tironi e Nilton Ribeiro, aos meus primos Thiago Tironi, Andrea Tironi e Vanessa Beneli pelo apoio, confiança e respeito em todas minhas decisões.

## RESUMO

No cultivo em ambientes protegidos, o uso da irrigação é necessário, requerendo alta frequência e gerando dependência tecnológica do produtor na aplicação de água e fertilizantes. Irrigações inadequadas potencializam problemas, trazendo prejuízos financeiros pela baixa produtividade e desperdício de solução nutritiva (SN) e energia. Adicionalmente, o descarte inadequado desses insumos pode contaminar o solo e, conseqüentemente, o lençol freático. Estudos mostram que os sistemas de subirrigação têm potencial para obter altas eficiências na irrigação nesses ambientes, principalmente, quando há a recirculação da solução nutritiva. Porém, os equipamentos existentes atualmente no mercado foram desenvolvidos sem critérios de engenharia e produzidos em pequena escala para atender condições específicas de produção resultando em elevado custo inicial. Adicionalmente, a falta de conhecimentos sobre a sua aplicabilidade para diferentes sistemas de produção e sobre recomendações do manejo hídrico e nutricional para culturas distintas, proporciona outra limitação na sua aplicação, desencoraja sua adoção pelos produtores. O projeto e construção de uma mesa de subirrigação utilizando critérios de engenharia, que permitam o reuso da SN e o controle automático do manejo hídrico nutricional para diferentes culturas, disponibilizará um equipamento com potencial para ser inserido no mercado nacional de produção em ambientes protegidos. O objetivo desse trabalho foi projetar uma mesa de subirrigação automatizada com reuso da SN, a partir da aplicação de critérios de projeto de engenharia. Essa pesquisa foi dividida nas seguintes etapas: levantamento de informações sobre sistemas de subirrigação existentes no mercado, avaliação de campo de um sistema em operação, estabelecimento de parâmetros de dimensionamento por simulação, e a construção e avaliação de protótipo de equipamento. Os levantamentos realizados não localizaram fabricantes nacionais de equipamentos de subirrigação, e mostraram que os equipamentos em operação apresentavam projetos desenvolvidos empiricamente e construídos a partir de demanda específica do produtor. O sistema de subirrigação em operação avaliado apresentou baixa eficiência de irrigação e aplicação de água devido a perdas e ao descarte de SN. Os critérios adotados para o projeto da mesa de subirrigação foram ergonômicos e de segurança, funcionalidade e aplicabilidade, a escolha do material construtivo. A aplicação dos critérios adotados possibilitou o estabelecimento das seguintes características da mesa de subirrigação: largura de 1,58 m,

comprimento variável, altura da borda de 0,06 m, chapa de poliestireno de alto impacto para a mesa e perfis de alumínio para a estrutura. A variação da combinação da vazão e do diâmetro do orifício de dreno associado ao controle automático do nível da lâmina na mesa de subirrigação atendem as exigências de manejo hídrico de diferentes culturas. possibilitam a redução do uso de mão de obra e evita descartes com a recirculação da SN. Os resultados de avaliação da mesa de subirrigação construída permitiram identificar diferentes combinações de manejo associada a variação da altura e tempo de permanência da SN no interior da mesa. Concluiu-se que a mesa de subirrigação construída a partir de critérios de projeto de engenharia, com controle automático da reutilização da SN, tem potencial para ser inserido no mercado de ambiente protegido, tendo a opção de ser empregada em diferentes recipientes de produção, cultura e manejo.

**Palavras-chave:** Irrigação por capilaridade; projeto de engenharia; equipamento de irrigação, reúso de água.

## **ABSTRACT**

Irrigation is a mandatory practice in greenhouse production, requiring high frequency and generating farmer technological dependency in water and fertilizers application. Low irrigation efficiencies increase production problems, bringing financial losses due to low yield and nutrient solution (NS) waste and energy cost. Additionally, the unsuitable disposal of these inputs can contaminate the soil and hence, the water resources. Studies showed that subirrigation systems have the potential for high efficiencies in greenhouse irrigation, especially when the recirculation of the nutrient solution is employed. However, subirrigation equipments currently available on the Brazilian market were designed without engineering criteria and produced on a small scale to meet specific production conditions, determining high initial investment cost. Furthermore, the lack of knowledge about its applicability to different production systems and water and nutritional management for distinct crops, provides another restriction in its application, and discourages producers in adopting this system. The design and construction of a subirrigation bench based on engineering criteria, enabling the NS reuse and the automatic control of water and nutrient management for different crops will provide a device with the potential to be introduced in the domestic market of greenhouse production. The objective of this work was to design an automated subirrigation bench with NS reuse, applying the fundamentals of engineering design criteria. This research was divided into the following steps: an information survey on commercial subirrigation systems, a subirrigation system field evaluation, establishment of parameters for sizing simulation and the construction and evaluation of prototype equipment. The survey results do not tracked national companies that manufacture detailed subirrigation equipment, and shown that equipment found in farm operations was designed and developed empirically and constructed from specific producer demands. The evaluated subirrigation system revealed low values of irrigation and water application efficiencies due to NS losses and frequent disposal. The criteria adopted for the subirrigation bench design were based on ergonomic and safety, functionality and applicability issues, and the manufacture material selection. The implemented design criteria enabled the establishment of the following subirrigation bench features: width 1.58 m, length adjustable, edge height of 0.06 m, high impact polystyrene sheets for the bench frame and aluminum sheets for the supporting structure. The

combinations of operation flow rate and drain orifice diameters, associated to the automated level control, allowed to establish water and nutrient management for different crops, reducing manpower needs and avoiding NS disposal due to the recirculated practice. The evaluation results of the assembled subirrigation bench showed that different management combinations can be performed by varying the NS depth and its residence time inside the equipment. It was concluded that the subirrigation bench constructed based on engineering design criteria, with automated management system and NS reuse, has the potential to be introduced in the greenhouse production market, with the option to be implemented to various crops and containers.

**Keywords:** Capillarity irrigation; engineering design; irrigation equipment; water reuse.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração do princípio da subirrigação com o umedecimento do meio de cultivo por capilaridade.....	11
Figura 2. Ilustração de sistemas de subirrigação mais comuns: piso de inundação (A), calhas em desníveis (B); mesas de subirrigação (C); bandejas móveis (D); manta capilar (E); e pavio capilar (F). .....	14
Figura 3. Diagrama das etapas do processo para a resolução de um problema em projetos de engenharia. (Fonte: Adaptado de KHANDANI, 2005). .....	20
Figura 4. Layout de identificação das posições dos módulos, blocos de mesas e mesas selecionadas para avaliações. ....	25
Figura 5. Ilustração do sistema de adução (A) e de drenagem (B) das mesas de subirrigação. ....	26
Figura 6. Esquema das componentes do balanço de SN na mesa de subirrigação. ....	27
Figura 7. Esquema do alcance médio da mão no plano sagital direito (A), e altura ideal de trabalho pesado de um operário brasileiro (B). (Fonte: ILDA, 1992). ....	34
Figura 8. Padrões de valores de largura do corredor para a movimentação de pessoas (Fonte: BOUERI FILHO, 2008).....	35
Figura 9. Ilustração do molde para fabricação da mesa de subirrigação. ....	48
Figura 10. Ilustração das partes constituintes da mesa de subirrigação: extremidade com dreno (A), parte do meio (B) e extremidade sem dreno (C). ....	48
Figura 11. Ilustração dos aspectos da montagem das partes moldadas (A) e a mesa de subirrigação montada (B). ....	49
Figura 12. Vista da estrutura de suporte da mesa de subirrigação construída com perfis de alumínio (A) e apoio do suporte com ajuste de altura tipo rosca (B). ....	49
Figura 13. Vista da localização das réguas graduadas no interior da mesa de subirrigação para medir a altura da lâmina de água. ....	52
Figura 14. Porcentagens médias da SN no armazenada pelo substrato, evapotranspirada, perdida nas mesas e perdas pelo transporte e descarte no módulo de subirrigação durante o período de irrigação. ....	61
Figura 15. Vista superior e detalhes dos módulos construtivos das mesas de subirrigação. ....	65

Figura 16. Vista dos detalhes dos canais preferenciais de adução e drenagem da água (A), e da localização do dreno na extremidade da mesa de subirrigação (B).....	65
Figura 17. Vista dos detalhes da inclinação da borda da mesa e das dimensões do canal de dreno e altura da mesa (mm). .....	66
Figura 18. Vista superior da estrutura de suporte da mesa de subirrigação.....	67
Figura 19. Ilustração do painel de controle do sistema de automação (A), e sensor de nível para o desligamento da motobomba (B). .....	71
Figura 20. Esquema das partes constituintes do sistema de automação do sistema de subirrigação. ....	72
Figura 21. Vista superior da mesa com as dimensões de comprimento e largura da mesa e largura do corredor em relação à lateral da estufa.....	73
Figura 22. Vista da mesa de subirrigação instalada na estufa experimental da FEAGRI/UNICAMP.....	74
Figura 23. Vista do detalhe da vedação das partes cortantes da mesa (A e B) e detalhe do sensor de nível para o manejo da lâmina de SN. ....	74
Figura 24. Variação temporal média da vazão de drenagem a cada minuto e a vazão média da mesa de subirrigação com lâminas de água de 0,01 (A), 0,03 (B) e 0,05 (C) m de altura.....	78
Figura 25. Vista do detalhe do orifício de adução e drenagem da mesa de subirrigação, do rebaixamento das canaletas e a válvula defletora. ....	79
Figura 26. Valores da altura da lâmina de água medida no interior da mesa de subirrigação para as alturas de 0,01, 0,03 e 0,05 m. ....	81
Figura 27. Valores do tempo de permanência de água no interior da mesa de subirrigação para as condições de vazão e altura de lâminas estudadas. ....	82
Figura 28. Valores de tempo de permanência no interior da mesa em função da altura de lâmina requerida para os diâmetros comerciais de dreno de ½' (12,7 mm), ¾' (19,1 mm), 1' (25,4 mm) e 1 ½' (38,1 mm) e vazões de 10, 20 e 30 L min <sup>-1</sup> . ....	84
Figura 29. Vista superior da mesa de subirrigação e detalhes dos canais de drenagem. ....	101
Figura 30. Vista superior de cada módulo da mesa de subirrigação e detalhes de encaixe dos módulos. ....	102
Figura 31. Detalhes de projeto da mesa de subirrigação.....	103
Figura 32. Corte AA, corte BB e corte CC da do desenho técnico da mesa de subirrigação. ....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores das dimensões dos perfis comerciais retangulares de alumínio adotados para simular a deformação da estrutura. ....	41
Tabela 2. Valores de vazão e altura da água no interior da mesa de subirrigação utilizados na determinação do volume, vazão de drenagem e tempos de adução e drenagem. ....	51
Tabela 3. Valores da vazão e volume de adução e drenagem, do volume de SN armazenado pelo substrato e volume estimado da evapotranspiração das plantas e perdido nas mesas de subirrigação por evento de irrigação. ....	57
Tabela 4. Valores médios do tempo de adução, tempo de drenagem, tempo de contato da solução nutritiva com o tubete e altura máxima da lâmina no tubete das mesas avaliada em cada módulo. ....	58
Tabela 5. Valores das percentagens médias do volume de retorno da SN aos reservatórios, evapotranspiração das mudas (ET), perdas nas mesas (PP), eficiência de armazenamento (Es), eficiência de aplicação (EA) e eficiência de irrigação (EI), com relação ao volume aduzido em cada mesa de subirrigação avaliada. ....	59
Tabela 6. Valores da eficiência de armazenamento (Es), eficiência de Irrigação (EI) e porcentagem de perdas (PP) em cada módulo de subirrigação avaliado. ....	62
Tabela 7. Valores das dimensões dos perfis comerciais e deformação máxima dos perfis transversais submetido à carga máxima, peso por metro linear e custo por metro linear de perfil. ....	68
Tabela 8. Valores das dimensões dos perfis comerciais, e das deformações máximas dos perfis longitudinais laterais submetidas à carga máxima, peso por metro linear e custo por metro linear de perfil. ....	69
Tabela 9. Valores médios de tempo de adução e drenagem para os sistemas com dreno aberto e fechado durante a adução de SN, diferença entre eles, volume bombeado no sistema com dreno aberto e fechado durante a adução para diferentes valores de lâminas e vazões de adução. ....	70
Tabela 10. Custo do material para a montagem e instalação da mesa de subirrigação na estufa experimental da FEAGRI. ....	75

Tabela 11 .Valores médios dos tempos de adução, drenagem e tempo total de permanência de água na mesa , volume de água aduzido na mesa, altura da lâmina de água no interior da mesa, vazões de adução e drenagem para as combinações de vazão e altura de lâmina. ....	77
Tabela 12. Valores médios da altura de lâmina e coeficiente de variação.....	79
Tabela 13. Dados das empresas e dos respectivos equipamentos de subirrigação comercializados. ....	95
Tabela 14. Relação das empresas visitadas, localização e sistema utilizado. ....	96
Tabela 15. Dimensões das bandejas dos principais fabricantes para produção de mudas .....	96
Tabela 16. Dimensões dos vasos dos principais fabricantes para produção de mudas.....	98
Tabela 17. Valores do ângulo de inclinação dos vasos dos principais fabricantes nacionais. ..	99
Tabela 18. Valores padronizados de largura e comprimento dos módulos de estufas produzidas no mercado nacional. ....	100
Tabela 19. Valores experimentais do tempo de adução e drenagem, leituras do hidrômetro, volume aduzido, altura média da lâmina, vazão de adução e de drenagem, na avaliação da mesa de subirrigação para as vazões e alturas de lâminas em estudo.....	104

## LISTA DE SÍMBOLOS

SN	Solução nutritiva;
$Q_{a_m}$	Vazão média de adução de SN na mesa em um evento de irrigação ( $L \text{ min}^{-1}$ );
$V_{a_m}$	Volume de adução de SN na mesa em um evento de irrigação (L);
$T_{a_m}$	Tempo de adução de SN na mesa em um evento de irrigação (min);
$V_{Et}$	Volume médio evapotranspirado de água nas mudas de eucalipto por mesa de subirrigação em uma hora (L);
Kc	Coefficiente da cultura (adimensional);
$ET_0$	Evapotranspiração de referencia ( $mm \text{ dia}^{-1}$ );
ETc	Evapotranspiração da cultura ( $mm \text{ dia}^{-1}$ );
Ar	Área do reservatório (mesa de subirrigação) ( $m^2$ );
NHSD	Número de horas de sol por dia ( $h \text{ dia}^{-1}$ );
$V_{p_m}$	Volume perdido de SN na mesa em um evento de irrigação (L);
$V_{d_m}$	Volume drenado de SN na mesa em um evento de irrigação (L);
$V_{s_m}$	Volume armazenado de SN na mesa em um evento de irrigação (L);
$E_{s_m}$	Eficiência de armazenamento da SN na mesa em um evento de irrigação;
$E_{A_m}$	Eficiência de aplicação da SN na mesa em um evento de irrigação;
$E_{I_m}$	Eficiência de irrigação da SN na mesa em um evento de irrigação;
$PP_m$	Porcentagem de perdas da SN na mesa em um evento de irrigação;
Es	Eficiência de armazenamento no módulo de irrigação;
PI	Período de irrigação (dias);
$N_{m_{mód}}$	Número de mesas no módulo de irrigação;
$NI_d$	Número de irrigações diárias no módulo;
$V_i$	Volume inicial de SN disponibilizada para o módulo de irrigação (L);
$V_r$	Volume médio de reposição de SN no módulo de irrigação (L);
Fr	Frequência de reposição no módulo de irrigação (dia);
EI	Eficiência de irrigação no módulo de irrigação;
PP	Porcentagem de perdas no módulo de irrigação;
Ptd	Perdas por transporte da SN e do descarte no final do período de irrigação no módulo (L);

$Y_{\text{máx}}$	deformação máxima da barra biapoiada (m);
$w$	Peso distribuído da carga na barra ( $\text{N m}^{-1}$ );
$l$	Comprimento da barra (m);
$E$	Módulo de elasticidade ( $\text{N m}^{-2}$ );
$I$	Momento de inércia da seção transversal do perfil ( $\text{m}^4$ );
$T_{\text{da}}$	Tempo de adução da SN da mesa para o sistema de dreno aberto (min);
$h$	Altura da lâmina requerida de SN no interior da mesa (m);
$Q_{\text{a}}$	Vazão de adução da mesa ( $\text{L min}^{-1}$ );
$Q_{\text{d}}$	Vazão de dreno da mesa ( $\text{L min}^{-1}$ );
$C_{\text{d}}$	Coefficiente de descarga do dreno (adotado 0,61);
$S$	Área da seção transversal da saída de dreno ( $\text{m}^2$ );
$g$	Aceleração gravitacional ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ );
$dh/dt$	Variação da altura da lâmina de água na mesa com o tempo ( $\text{m s}^{-1}$ );
$T_{\text{da}}$	Tempo total de drenagem da SN da mesa para o sistema de dreno aberto (min);
$V_{\text{da}}$	Volume de SN utilizado para atingir a altura requerida no sistema de dreno aberto durante a adução (L);
$T_{\text{df}}$	Tempo de adução da SN da mesa para o sistema de dreno fechado (min);
$T_{\text{df}}$	Tempo de drenagem da SN da mesa para o sistema de dreno fechado (min);
$V_{\text{df}}$	Volume de SN utilizado para atingir a lâmina requerida no sistema de dreno fechado (L);
$T_{\text{drenagem}}$	Tempo de drenagem da mesa de subirrigação (s);
$C_{\text{d}}$	Coefficiente de descarga do dreno (adimensional);
$h_{\text{dreno}}$	Profundidade do dreno a partir da lâmina zero (m);

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. HIPÓTESE</b> .....	<b>4</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>4</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
<b>4.1. Produção em ambiente protegido</b> .....	<b>5</b>
4.1.1. Características da produção em ambiente protegido .....	5
4.1.2. Irrigação em ambiente protegido.....	6
4.1.3. Descarte e reuso da água.....	9
<b>4.2. Subirrigação</b> .....	<b>11</b>
4.2.1. Sistemas de subirrigação.....	14
4.2.2. Automação e controle .....	16
<b>4.3. Projetos de engenharia</b> .....	<b>19</b>
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
<b>5.1. Levantamento de informações, avaliação e caracterização dos sistemas de subirrigação</b> .....	<b>22</b>
5.1.1. Levantamento de informações .....	22
5.1.2. Avaliação e caracterização do sistema de subirrigação .....	23
<b>5.2. Projeto do equipamento de subirrigação</b> .....	<b>31</b>
5.2.1. Definição e caracterização dos critérios .....	31
5.2.2. Projeto e dimensionamento da mesa de subirrigação .....	38
5.2.3. Construção do protótipo da mesa de subirrigação .....	47
5.2.4. Análise de custo do protótipo da mesa .....	50
<b>5.3. Avaliação da mesa de subirrigação</b> .....	<b>50</b>
5.3.1. Parâmetros de operação .....	50
5.3.2. Deformação da estrutura e uniformidade da lâmina de água no interior da mesa	51
<b>5.4. Simulações operacionais de manejo</b> .....	<b>52</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>54</b>

<b>6.1. Caracterização e avaliação de um sistema de subirrigação .....</b>	<b>54</b>
6.1.1. Caracterização do sistema de subirrigação .....	54
6.1.2. Avaliação do sistema de subirrigação .....	56
6.1.3. Consideração sobre critérios de projeto.....	62
<b>6.2. Projeto e construção do equipamento de subirrigação .....</b>	<b>63</b>
6.2.1. Projeto da mesa de subirrigação.....	63
6.2.2. Construção do protótipo da mesa de subirrigação .....	72
6.2.3. Análise do custo de fabricação do protótipo da mesa de subirrigação .....	75
<b>6.3. Avaliação da mesa de subirrigação.....</b>	<b>76</b>
6.3.1. Avaliação dos parâmetros de operação .....	76
6.3.2. Análise de deformação no interior da mesa .....	79
6.3.3. Simulações operacionais de manejo .....	81
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>8. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>86</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo I: Identificação e caracterização de sistemas de subirrigação.....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo II: Projeto da mesa de subirrigação .....</b>	<b>101</b>
<b>Anexo III: Dados experimentais da avaliação da mesa de subirrigação. ....</b>	<b>104</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os cultivos em ambientes protegidos, tais como os realizados em estufas, casas de vegetação e viveiros, está em crescimento no Brasil, exigindo inovações tecnológicas para suprir suas necessidades. As técnicas de produção nesses ambientes estão sempre em processo de evolução, que apresentam como principal característica a possibilidade do controle das variáveis climáticas e de produção, garantindo assim, uma produção com melhor qualidade final. No Brasil, a área ocupada por cultivos em ambientes protegidos consistia, segundo o IBGE (2006), em aproximadamente 100 mil hectares.

Em ambientes protegidos é obrigatório o uso da irrigação, exigindo que os produtores utilizem diferentes sistemas para fornecer água e fertilizantes às culturas, tais como, aspersão, microaspersão, gotejamento e subirrigação, que são os sistemas mais empregados nesses sistemas produtivos. Os eventos de irrigação ocorrem com frequência, exigindo elevada eficiência de aplicação e adequada uniformidade de distribuição de água às plantas.

A irrigação em ambientes protegidos gera uma maior dependência tecnológica da produção com relação à aplicação de água e fertilizantes, quando comparada com a situação de campo aberto. Operações realizadas de forma inadequada podem maximizar problemas, tais como, o desperdício de solução nutritiva (SN) e energia, e descartes dos insumos. Essa questão fica evidenciada em cultivos realizados nos recipientes, onde não há recirculação e o reaproveitamento da solução, tornando ineficiente a operação do sistema pelo uso excessivo de água e nutrientes por unidade de produção. A SN perdida na irrigação é, geralmente, descartada em solos, rios ou lagos, e que, devido aos sais diluídos presentes em sua composição, possuem potencial de contaminação e também resultam em prejuízo financeiro para o produtor.

A não reutilização do excesso de SN descartada nos eventos de irrigação é consequência de uma série de fatores, tais como: a inexistência de lei ambiental específica sobre destino de descartes ou rejeitos dessas soluções, práticas convencionais de irrigação em ambientes protegidos; deficiência na fiscalização de órgãos governamentais responsáveis; receio da ocorrência de problemas fitossanitários pela recirculação; falta de adoção de critérios de manejo adequados; e outros.

A subirrigação ou irrigação por capilaridade é uma opção para plantas cultivadas em vasos ou recipientes, com potencial para minimizar e até evitar problemas com desuniformidade de distribuição de água, de descartes e desperdícios de SN, reduzindo os riscos de contaminações ambientais, principalmente quando a SN é reutilizada a SN, conseqüentemente, apresenta potencial de aumentar a lucratividade. Nesse sistema de irrigação, a água e nutrientes são elevados às camadas superiores do meio de crescimento da cultura por capilaridade, que promove ascensão da água ou SN pela interação do ângulo de contato das forças de tensão superficial, adesão e coesão, disponibilizando-as para as plantas. Após ocorrer o umedecimento adequado do meio, a água ou SN excedente é drenada para fora do sistema, podendo ser reutilizada.

O emprego da subirrigação em ambientes fechados pode ser realizado por diferentes equipamentos, tais como mesas de subirrigação, bandejas móveis, piso de inundação, manta capilar, pavio capilar e calhas em desníveis. Esses equipamentos apresentam como vantagens a possibilidade de automação do processo com reuso da SN e de serem construídos de forma a adequar o manejo da irrigação para diferentes plantas e suas fases de crescimento, abrangendo uma ampla variedade de recipientes.

Dentre os equipamentos de subirrigação para ambiente protegido utilizados em países como, EUA, Canadá, Espanha, Holanda e Austrália, as mesas de subirrigação, chamadas de sistemas *ebb-and-flow* (encher e drenar), predominam. Nesses países, as mesas apresentam projetos avançados em termos tecnológicos e de operação, principalmente com a redução do uso de mão-de-obra pela automação completa do processo produtivo. No Brasil, entretanto é pouco difundido e o seu uso é limitado a condições específicas de produção, devido à falta de conhecimento da sua aplicabilidade para diferentes sistemas de produção e a pouca informação existente sobre os manejos hídrico-nutricionais.

A falta de demanda pelas mesas de subirrigação gera baixa oferta desse equipamento no mercado nacional, que apresenta, como consequência, poucos fabricantes interessados no seu desenvolvimento e em torná-las mais eficientes e adequadas ao produtor. Dessa forma, os equipamentos disponíveis apresentam pouca tecnificação, por serem fabricadas em pequena escala e sem aplicação de critérios de engenharia para atender condições específicas de produção. Essas características determinam uma elevação no custo inicial de investimento,

baixo desempenho do sistema, que acaba desencorajando ainda mais os produtores na sua adoção.

Dentro desse contexto, o grupo de pesquisa “*Tecnologia de Irrigação e Meio Ambiente*”, da Faculdade de Engenharia Agrícola/FEAGRI da Universidade Estadual de Campinas vêm estudando desde 2006, técnicas e equipamentos que viabilize o uso da subirrigação em ambientes protegidos. Nesse período, foram desenvolvidos protótipos de bandejas móveis para atingir uma configuração comercial. Os primeiros equipamentos desenvolvidos apresentaram limitações na sua construção, devido à escolha incorreta do material, como no uso de resina acrílica, que apresentou toxidez e baixa resistência mecânica, restrições no manuseio, transporte e manutenção.

Para buscar alternativas viáveis para promover uma difusão do uso de mesas de subirrigação em ambientes protegidos, o projeto e construção de um sistema devem considerar como essencial a aplicação de conceitos e critérios de engenharia, incluindo parâmetros ergonômicos, de segurança, hidráulicos e econômicos, que aumentem a sua utilização e permita o manejo com recirculação da solução nutritiva em circuito fechado. Desta forma, buscou-se a definição e o emprego de critérios de engenharia no projeto de uma mesa de subirrigação que utilize o princípio da capilaridade, com potencial de atender as exigências do mercado nacional e aplicável para diferentes sistemas produtivos em ambientes protegidos.

## **2. HIPÓTESE**

O desenvolvimento de uma mesa de subirrigação com operação automática, a partir da aplicação de critérios de projeto de engenharia e que permita o reuso da solução nutritiva e o controle do manejo hídrico-nutricional para diferentes plantas, disponibilizará um equipamento com potencial para utilização em ambiente protegido com aplicabilidade para diferentes recipientes de produção, culturas e manejo.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1. Objetivo Geral**

Desenvolver uma mesa de subirrigação que opere automaticamente com recirculação da solução nutritiva, aplicando critérios de engenharia que permita a aplicabilidade para diferentes recipientes de produção, culturas e manejo, para ser inserida no mercado nacional.

### **3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar e caracterizar sistemas de subirrigação existentes no mercado.
  - Realizar um levantamento dos equipamentos de subirrigação existentes no mercado nacional e internacional, caracterizando os tipos, dimensões e sistemas de produção;
  - Avaliar um equipamento de subirrigação em operação.
- Projetar e avaliar um protótipo de mesa de subirrigação;
  - Definir critérios de projeto a serem atendidos no desenvolvimento do equipamento, como, por exemplo, ergonômico, de segurança, hidráulico, econômico, aplicabilidade e manejo;
  - Projetar e simular a operação do equipamento de subirrigação por programas computacionais;
- Construir e avaliar um protótipo de mesa de subirrigação operando em condições experimentais.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1. Produção em ambiente protegido**

#### **4.1.1. Características da produção em ambiente protegido**

Os cultivos realizados em ambientes protegidos se caracterizam por permitir o controle das variáveis edafoclimáticas (vento, solo, umidade do ar, temperatura e radiação), por possibilitar a automatização das estruturas de cultivo e das práticas culturais, uso da fertirrigação e a implantação de culturas em regiões e épocas do ano naturalmente desfavoráveis à sua exploração (FIGUEIREDO, 2011). Essas características requerem a aplicação de tecnologias diferenciadas na produção e o desenvolvimento constante de pesquisas, uma vez que, além do controle das variáveis, a produção se caracteriza também por cultivos intensivos com alto retorno financeiro ao agricultor (LAGE, 2011).

No Brasil, a expansão da produção em ambiente protegido ocorreu a partir da década de 80, do século passado, com o desenvolvimento da indústria de material plástico no país, que exigiu a adição de novas tecnologias empregadas nesse tipo de cultivo (AGUIAR et al., 2004). Segundo o IBGE (2006), a área de cultivo com flores (inclusive hidropônica e plasticultura), viveiros de mudas, estufas e casas de vegetação era de aproximadamente 100 mil hectares no Brasil.

A evolução tecnológica desse setor fica evidenciada pelas modernas instalações e equipamentos empregados nos setores produtivos mais tecnificados, que oferecem um potencial adequado de produção. Segundo Bliska Junior e Honório (1996), o avanço da informática propiciou aos agricultores dos países desenvolvidos uma economia de mão de obra e energia nas diversas operações de manejo envolvidas em ambientes protegidos, como a automação do fornecimento da solução nutritiva, da ventilação, do controle fotoperiódico, do sombreamento artificial, da movimentação das cortinas, da concentração constante dos níveis de CO<sub>2</sub>, buscando a exploração máxima do seu potencial, para aumentar a eficiência de desempenho da cultura.

Segundo NGMA (2011), o objetivo da produção em ambiente protegido é reduzir os custos de insumos e manter ou aumentar a qualidade por unidade de produção. Segundo esse

autor, para atingir esse objetivo é necessário obter o controle adequado de todas as variáveis envolvidas; maior eficiência energética; eficiência do trabalhador; melhores práticas de gestão de umidade, temperatura e irrigação; redução do uso de água, fertilizantes, pesticidas; redução dos desgastes de equipamentos; e aumento da uniformidade da qualidade e produtividade das plantas, que se dá por meio da uniformidade de aplicação da SN, com cuidados necessários para não causar proliferação de doenças. Porém, salienta-se que a obtenção desses resultados vai requerer do produtor alto investimento com custos elevados de produção.

Teruel (2010) relata que, apesar dos avanços e pesquisas no uso de eletrônica, tecnologias de informação e de controle automático em ambiente protegido, visando a qualidade e eficiência de produção, existe um distanciamento entre os resultados da pesquisa e a suas aplicações em sistemas comerciais em operação, devido a limitações operacionais das tecnologias desenvolvidas. As pesquisas tecnológicas e os equipamentos desenvolvidos devem buscar, a medida do possível, ser aplicáveis ao sistema produtivo. No entanto, para a melhoria da sua aceitação no mercado, a pesquisa deve ser conduzida sob a ótica do sistema produtivo e não apenas das instituições, e os equipamentos deve ser desenvolvidos mesclando critérios de projeto com as necessidades do sistema produtivo em campo.

No entanto, apesar de existir pesquisas avançadas e dispostas no mercado nacional para serem empregadas em muitos dos setores de produção em ambientes protegidos, como o controle automatizado da climatização (umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura), ainda se necessita buscar o aprimoramento de outras técnicas envolvidas, e no desenvolvimento de equipamentos, principalmente, aqueles que otimizem a utilização da água pelas culturas, pois as pesquisas relacionadas à irrigação em ambiente protegido ainda são deficientes no Brasil. Essa ação é fundamental para reduzir o consumo de insumos e melhorar a eficiência dos processos de distribuição e aplicação de água, os quais devem ser realizados por sistemas de irrigação mais eficientes.

#### **4.1.2. Irrigação em ambiente protegido**

Nos sistemas de cultivo em ambientes protegidos há o impedimento físico do efeito direto das variáveis climáticas sobre a produção, dentre elas, a chuva. Por esse motivo, a irrigação é obrigatória, e para viabilizar a produção, otimizar as operações de manejo e fazer

uso eficiente dos nutrientes, essa técnica também pode disponibilizar SN às culturas via fertirrigação (OLIVEIRA et al., 2008). Portanto, nessas condições, a planta é extremamente dependente da operação de irrigação, sendo que a escolha do método mais adequado pelo produtor juntamente com o manejo da água ou SN é fundamental, para evitar equívocos que poderão comprometer a cultura, principalmente nos períodos onde a exigência pela SN é mais elevada.

Assim, o sistema de irrigação empregado afeta o manejo de produção devido ao fornecimento de água e nutrientes em torno das raízes das plantas, e nos custos de produção devido aos equipamentos instalados, automação e/ou mão de obra exigida (ANDRIOLO et al., 2001). Da mesma forma o método e o sistema de irrigação empregado no sistema produtivo em ambiente protegido tem influencia direta na eficiência de aplicação de SN (SN), consequentemente na eficiência de produção.

Dentre os métodos de irrigação utilizados em ambiente protegido, os mais empregados são aspersão, microaspersão, gotejamento e subirrigação, que apresentam limitações e vantagens no seu uso em função da aplicação que terá nesse sistema de cultivo. Dentre eles, os métodos de irrigação mais eficientes são o gotejamento e a subirrigação (quando utiliza o reuso da SN), quando comparados aos métodos de aspersão e microaspersão. No entanto, quando mal selecionados e inadequadamente manejados, todos os métodos se mostram ineficientes, podendo causar desperdícios de água ou SN.

Nas irrigações realizadas como aspersão, microaspersão e a aspersão manual, comumente utilizada por produtores em ambiente protegido, o descarte de água e SN é frequente, e pode causar sérios danos ao meio ambiente. Andriolo et al. (2001) constatou que a irrigação pelo método da microaspersão com elevada frequência, favorece a lixiviação de nutrientes contidos no substrato. Salvador (2010), realizando trabalhos com porta enxertos de citros, estimou uma perda média de 6.440 m<sup>3</sup> de água por mês, e de aproximadamente 9.720 kg de sais para a fase de sementeira na produção de mudas de citros no estado de São Paulo, devido a utilização da irrigação por aspersão manual do tipo chuveiro e do manejo adotado pelos produtores.

Entretanto, outros métodos se apresentam mais eficientes, como é o caso da irrigação por gotejamento, que tem como principal vantagem a alta uniformidade de aplicação de água, possibilitando a utilização da fertirrigação (OLIVEIRA et al., 2008). Apesar disso, este

sistema pode apresentar manutenção elevada devido a determinados problemas, como entupimentos de emissores (COELHO et al., 2010), e também por problemas de falta de conhecimento técnico pelos produtores no seu uso, como o encontrado por Sousa et al. (2010), onde produtores de melão aplicavam água em excesso, esperando que, com maior oferta hídrica as plantas aumentassem sua produtividade, causando, no entanto, a lavagem de nutrientes e aumento no risco de doenças nas plantas. Além dos entupimentos e lavagem de nutrientes, o gotejamento exige mão-de-obra para manutenção, aumentando o custo de produção.

Outro método de irrigação utilizado em ambientes protegidos é a subirrigação, que consiste na utilização do princípio da capilaridade para levar a água e nutrientes até as raízes das plantas, por meio do umedecimento do meio de crescimento da cultura. Apesar de ser empregada em menor escala quando comparada a outros sistemas de irrigação, a subirrigação apresenta vantagens quando utilizada em ambiente protegidos, como aumento de produção por unidade de área, melhor uniformidade de planta, redução no período de crescimento, e a eliminação da perda de água e lixiviação de nutrientes quando possui sistemas de recirculação da água (DUMROESE et al., 2006). Por outro lado, a subirrigação pode ter inconvenientes, pelo custo elevado para a implantação inicial, falta de critérios para o manejo, e aumento do risco de disseminação de patógenos, o que segundo Fischer (2011) pode ser reduzido com manejo adequado. Esse autor afirma ainda que para diminuir o custo e aumentar a disponibilidade de informações adequadas de manejo, é necessário aumentar a demanda por esse tipo de sistema com a construção e difusão de novos equipamentos de subirrigação.

A implantação e uso de um sistema de irrigação requer o conhecimento sobre os equipamentos instalados, assim como, sobre a sua operação e manejo. No entanto, para o caso do sistema de subirrigação, as informações são escassas quando comparado a outros sistemas, e, apesar das suas vantagens, os produtores optam pela utilização dos sistemas mais conhecidos como aspersão e gotejamento. Dessa forma, é possível afirmar que enquanto não houver equipamentos e informações claras sobre sistemas de subirrigação aplicados ao sistema produtivo nacional de ambiente protegido, os produtores manterão a rejeição a esses sistemas.

### **4.1.3. Descarte e reuso da água**

Um dos problemas sérios e recorrentes na irrigação em ambientes protegidos é o descarte de água e fertilizantes no solo pelos sistemas operando em ciclo aberto, sem a reutilização dos insumos. Mangiafico et al. (2010) observaram que, com o manejo adequado da irrigação, há redução no consumo de água e fertilizantes, diminuindo o descarte no meio ambiente, que pode contaminar o solo e o lençol freático.

Na Austrália, onde o cultivo em ambiente protegido é predominantemente empregado por pequenos agricultores que não utilizam a recirculação da SN provinda da irrigação, Grewal et al. (2011), estudando o uso eficiente de água e nutrientes, constatou que durante 13 semanas, apenas 38% da SN da irrigação na cultura do pepino, foi usada pela cultura, e os outros 62% foi descartada diretamente com a drenagem. Os estudos desses autores também revelam que existe um potencial significativo para a economia de água e nutrientes em ambientes protegidos, mudando as práticas para sistemas que fazem a reutilização da SN, assim como relatam também os trabalhos de Thomas et al. (2009). Uma pesquisa realizada entre 2000 e 2002 por Richard et al. (2013) mostrou que quase metade dos produtores de hortaliças e 30% dos produtores de flores em Ontario, Canada, estavam recirculando ou reciclando a SN, devido a exigência das legislações do país e a conscientização dos produtores por conhecerem os problemas causados pelo descarte.

Outro problema causado pelo descarte das soluções nutritivas provenientes da produção em ambientes protegidos que não fazem uso da recirculação ou reuso, é que esse rejeito se transforma em uma fonte de poluição difusa da atividade, com propriedades agrícolas gerando contaminantes com níveis que excedem os padrões de qualidade de água mundialmente aceitos. O descarte das soluções nutritivas contribui na forma de sedimentos em excesso, nutrientes, sais, pesticidas, ou organismos patógenos (MELLANO, 2011).

Quando se usa a subirrigação com ciclo fechado, ou seja, com reuso e recirculação da água e SN, há menor consumo de água e fertilizantes, evitando descartes e reduzindo o impacto ambiental gerado pelos descartes da solução em excesso da irrigação, além de diminuir o requerimento de mão de obra e fertilizantes (RICHARD et al., 2013). Montesano et al. (2010), estudando a recirculação da SN para a cultura do tomate cereja, concluiu que para a disseminação dessa tecnologia é necessário simplificar o manejo da SN, e disponibilizar as

informações aos produtores. Segundo os autores, essas ações são necessárias, pois a recirculação da SN provoca a redução dos valores de pH, CE e concentração dos nutrientes ao longo do tempo, exigindo a reposição de nutrientes baseada nos valores requeridos dessas variáveis e buscando manter as características iniciais da SN no seu retorno ao sistema (GREWAL et al., 2011).

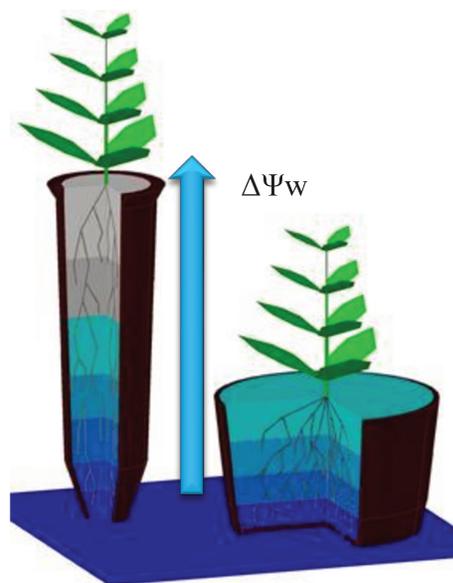
Zheng et al. (2010) estudando a recirculação de SN em sistemas de subirrigação, constataram o aumento da concentração de sais na camada superior dos vasos com mini rosas, no entanto, em teores não tóxicos. Esses autores verificaram também que a concentração da SN pode ser reduzida para 75% do requerido com a utilização da recirculação da SN nesses sistemas de produção para mini rosas. Segundo Liu et al. (2012), a redução da concentração de fertilizantes no sistema de subirrigação se deve porque não há a lixiviação de nutrientes do meio e da SN, podendo dessa forma diminuir a concentração de fertilizantes na SN.

No entanto, o uso de sistemas de ciclo fechado com reuso e recirculação da SN, requer alguns cuidados, pois segundo Meador et al. (2012), esses sistemas que mantem água e nutrientes recirculando no interior do sistema de irrigação resultam, ao longo do tempo de uso, em águas de baixas qualidades, quando comparado com o estado inicial da água da irrigação, trazendo prejuízos no sistema com contaminação, entupimentos e corrosões das tubulações, que reflete na eficiência do sistema e na qualidade da produção. Além disso, esses autores recomendam o monitoramento da água e da SN desde a fonte de captação até a planta no sistema de produção. Apesar dessas limitações, esses autores entendem que o emprego do reuso e da recirculação de água deve ser difundido para tornar o sistema mais eficiente.

Portanto, para tornar a irrigação em ambiente protegido mais eficiente, é necessário adoção de técnicas que promovam a recirculação e reaproveitamento da SN, como a subirrigação, que permite a automação do processo, além de apresentar potencial para aumentar a produção por meio de uma irrigação mais uniforme e eficiente, com melhor aproveitamento da água e nutrientes pelas plantas. Mas, para isso, a técnica deve ser mais difundida, com desenvolvimento de equipamentos, disponibilizando meios para que os produtores possam aderir ao seu uso.

## 4.2. Subirrigação

A subirrigação é o método de irrigação que utiliza a ação da capilaridade no processo de umedecimento do meio de cultivo e das raízes da cultura com a elevação da água e nutrientes, a partir da saturação pela parte inferior dos recipientes de produção (Figura 1). A diferença do gradiente do potencial total entre dois pontos no meio de cultivo determina a movimentação da água, que flui do local de maior para outro de menor potencial. Esse fenômeno permite que a água possa realizar tanto o movimento descendente, denominado percolação, como o movimento ascendente, denominado ascensão capilar (MILLAR, 1988).



**Figura 1. Ilustração do princípio da subirrigação com o umedecimento do meio de cultivo por capilaridade.**

A subirrigação se apresenta como uma alternativa que tem o potencial de maximizar o uso da água em ambientes protegidos, principalmente, se operar em um circuito fechado de irrigação, onde a água com nutrientes é recirculada dentro do sistema, operando sem desperdícios. Essa prática de irrigação é mais eficiente que outras, propiciando melhores resultados com o aumento da produção e de uniformidade e, também, permitindo a aplicação de fertilizantes via água de irrigação (ROUPHAEL et al., 2006).

Quando comparada com aos métodos tradicionais de irrigação usados em ambientes fechados, que molham a parte aérea da planta, a subirrigação contribui para reduzir o estabelecimento de doenças fúngicas e bacterianas disseminadas pela água, por umedecer

apenas o solo ou substrato por ascensão capilar (SCHÄFER, 2004). De acordo com Rouphael et al. (2006), a subirrigação apresenta vantagens com relação a aspersão como: redução de custos operacionais, maior produção por área quando usa mesas móveis, redução da disseminação de patógenos e possibilidade de aplicação de defensivos e estimuladores de crescimento vegetal. A subirrigação além de permitir a redução da quantidade de água necessária às plantas, ela também possibilita a redução do uso de nutrientes, evitando o descarte e lixiviação da SN, aumentando a eficiência do uso de fertilizantes (SCHMAL, et al., 2011), e diminuindo a utilização de mão-de-obra e o custo de produção (MONTESANO et al., 2010).

Outra vantagem desse método foi constatada por um estudo feito com diferentes formas de bancadas, aplicando SN por meio da subirrigação na produção do morangueiro, onde constatou que a produção das plantas foi influenciada pelas formas de bancadas e pela eficiência da fertirrigação, que podem ter favorecido a uniformidade de molhamento dos substratos, disponibilizando maior volume de SN para cada planta (GODOI et al., 2009). O mesmo resultado foi encontrado em estudos realizados por Andriolo et al. (2001), onde o sistema de irrigação usando este princípio favoreceu o melhor crescimento de mudas de tomateiro e melão pelo fato de fornecer água e nutrientes às mudas sem interferir negativamente sobre outros processos que condicionam o crescimento, como a disponibilidade de oxigênio e nutrientes do meio de crescimento.

Barreto (2010) comprovou outras vantagens da subirrigação em estudos realizados na produção de porta-enxertos de mudas cítricas, quando comparado com o método tradicional de irrigação manual, como: maior disponibilidade de água para as plantas, que refletiu positivamente no desenvolvimento de mudas cítricas. Este autor verificou que o melhor desenvolvimento das plantas irrigadas por capilaridade foi o reflexo do seu melhor status hídrico proporcionado pela subirrigação, resultado de uma melhor troca de gases, menor temperatura foliar e maior enfolhamento com estômatos mais eficientes. Essas vantagens também podem ser vistas nos resultados encontrados por Andriolo et al. (2001), que indicaram que o método de subirrigação se constitui em uma alternativa para a produção de mudas de hortaliças, que apresentaram alta qualidade nos períodos quentes do ano.

O sistema de subirrigação também consistiu em uma alternativa eficiente para a produção da flor Coneflower (*Echinacea purpurea*), promovendo o aumento no tamanho das

mudas, melhorando a absorção das plantas por nitrogênio, reduzindo a mortalidade e provocando menos lixiviação da SN em pesquisa desenvolvida por Pinto et al. (2008). Neste mesmo trabalho, concluiu-se que a produção de plantas foi de alta qualidade, não houve rejeito da SN no solo, reduzindo a contaminação ambiental, com a possibilidade de se utilizar a técnica em pequenas áreas produtivas.

Dispositivos controlados automaticamente, capazes de armazenar e reutilizar os volumes de água drenados após cada irrigação devem ser utilizados para viabilizar o uso racional dos recursos hídricos em sistemas de subirrigação. Barreto (2010) afirmou que a obtenção de eficiências adequada na subirrigação requer o fechamento do circuito hidráulico do sistema promovendo o reuso da água, para melhor aproveitamento da água e nutrientes. Apesar de haver vantagens em recircular água e nutrientes no sistema de irrigação fechado, o que reduz os custos com água, fertilizantes, energia, mão de obra e possíveis desgastes dos equipamentos e acessórios, a recirculação tem inconvenientes, como: o custo de implantação do sistema que requer o controle das taxas de fertilizantes e pH da solução, para fornecer a concentração correta às plantas; os riscos de doenças e contaminação por patógenos pela SN recirculada; e o custo elevado dos equipamentos de desinfecção, quando necessários (MAJSZTRIK et al., 2011). No entanto, Schmal et al. (2011) enfatizam que a possibilidade de proliferação de doenças é um dos fatores que mais inibem os produtores a aceitar e experimentar os sistemas de subirrigação.

Embora a subirrigação tenha potencial para apresentar eficiência adequada, ainda há questões e dúvidas a respeito do manejo nutricional das plantas e dos equipamentos que sejam capazes de fornecer a melhor resposta da cultura e, conseqüentemente, melhor aproveitamento das aplicações das soluções nutritivas (TEIXEIRA et al., 2010). Além disso, ainda não existem equipamentos específicos de subirrigação disponíveis no mercado nacional, acrescentado ao fato que as informações técnicas a respeito desse método de irrigação na literatura são limitadas, principalmente, para aplicação no sistema produtivo brasileiro. Apesar disso, Schmal et al. (2011), recomendam que os produtores e viveiristas devem buscar as inovações e pesquisar melhor a técnica para conhecer os benefícios da subirrigação e, conseqüentemente, aumentar o seu uso.

#### 4.2.1. Sistemas de subirrigação

Existem diferentes meios de usar a subirrigação ou sistemas que usam o princípio da capilaridade. McAvoy (1996) apresentou algumas tecnologias de subirrigação empregadas em ambientes protegidos, como o piso de inundação (Figura 2 A), calhas de cultivo (Figura 2 B) e mesas de subirrigação (Figura 2 C), exemplificando as suas características na. Outros estudos de sistemas de subirrigação são apresentados por Uva et al. (2000), que trabalhou com quatro tipos de sistemas: piso de inundação (*Flood-and-Floor*) (Figura 2 A); canais ou calhas rasas em desnível (*Trough Benches*) (Figura 2 B); bandejas móveis (Figura 2 D) e mesas de subirrigação (*ebb-and-flow benches*), (Figura 2 C), sendo esse sistema de subirrigação o mais usado nos Estados Unidos.



**Figura 2. Ilustração de sistemas de subirrigação mais comuns: piso de inundação (A), calhas em desníveis (B); mesas de subirrigação (C); bandejas móveis (D); manta capilar (E); e pavio capilar (F).**

Nas calhas em desníveis (Figura 2 B), à água e nutrientes se movimenta de uma extremidade a outra da calha, utilizando apenas a força da gravidade. Este sistema apresenta limitações em relação às dimensões dos recipientes de produção, não permitindo o uso de bandejas, e suas dimensões são padronizadas pelos fabricantes.

A bandeja móvel é um sistema que foi estudado no Brasil por Salvador (2010) e Barreto (2010) (Figura 2 D). Esse equipamento pode ser definido como uma estrutura vedada

para realizar a reutilização da SN, apresentando suportes para fixação de tubetes, para ser transportados até o campo.

As mesas de subirrigação (*ebb-and-flow bench*) são mesas niveladas e apoiadas sobre pés ou cavaletes ajustáveis, com abas ou bordaduras laterais formando um reservatório, permitindo o armazenamento de lâminas de água (Figura 2 C). Nesse sistema, a água ou SN preenche o reservatório formado pela mesa, onde estão os recipientes com o meio de cultura e as plantas, ficando em contato com eles por um determinado tempo para que haja o efeito da capilaridade no meio de cultivo, e depois drenada. A entrada e a saída da SN podem acontecer por uma única tubulação, ou por tubulações diferentes, dependendo da tecnologia empregada em cada sistema.

O sistema denominado piso de inundação (Figura 2 A) consiste em um piso de concreto em desnível no chão, no formato de uma piscina com profundidade reduzida, preenchendo todos os espaços disponíveis para produção. Pela disposição dos recipientes no chão, esse sistema demanda esforço físico do trabalhador, que tem que realizar os serviços agachado.

Outras formas de irrigação por capilaridade são os sistemas com manta capilar (Figura 2 E) e por pavio capilar (Figura 2 F). A manta capilar consiste em um tecido ou manta colocada sobre a bancada, tipo feltro, que é umedecida e saturada pela SN, ficando em contato com a parte basal dos vasos ou recipientes. Desta forma, por meio do princípio da capilaridade, a SN umedece o meio em que as raízes se encontram. O pavio capilar segue o mesmo princípio da manta, porém o tecido é fixado na parte inferior de uma calha e fica em contato direto com o meio de crescimento da cultura. Um estudo feito por Million et al. (2007), concluiu que a irrigação por pavio capilar deve ser utilizada, principalmente para a manutenção da irrigação de plantas de interiores, mas não é adequada para produção comercial em larga escala. Esses autores estudaram a resposta da produtividade da Azaleia, que é uma planta sensível ao excesso de fertilizantes, para diferentes métodos de irrigação, e concluíram que o pavio capilar fornece fertilizante a taxas comparáveis à subirrigação, que foi considerado como um método de irrigação eficiente no uso de fertilizante.

Uva et al. (1998) fizeram um levantamento dos tipos de sistemas de subirrigação utilizados nos Estados Unidos, e encontraram predominância da utilização do sistema de irrigação do tipo mesa de subirrigação, devido a existência de empresas que fabricam e

comercializam o equipamento, facilidade de instalação e possibilidade de automação. Em seu trabalho esses autores concluíram que subirrigação é uma tecnologia de irrigação promissora, por apresentar inúmeras vantagens quando comparada aos demais sistemas disponíveis para cultivo em ambiente protegido. Diferentemente, no Brasil, a ausência de equipamentos comerciais impossibilita a sua implantação em larga escala, se tornando a maior limitação para expansão desse tipo de tecnologia na agricultura de ambientes protegidos.

O investimento inicial para aquisição de equipamentos que realizam a irrigação por capilaridade pode ser considerado elevado, sendo que produtores têm relatado que esses sistemas podem ser pagos a partir de 3 a 4 anos, além das vantagens que apresentam como, facilidade e qualidade de funcionamento do equipamento, eficiência na irrigação apresentando altas uniformidades, e sanidade do local de trabalho e das plantas (YANIK, 2009). No entanto os sistemas de subirrigação podem variar de técnicas simples até aplicações com alta tecnologia (SCHMAL et al., 2011), sendo que o tempo de retorno de toda a instalação do sistema de subirrigação segundo Cox (2013) é de 5 a 10 anos para os sistemas mais tecnificados, e de 2 a 3 anos para os menos tecnificados.

Estudos realizados comprovam as vantagens do uso dos sistemas de subirrigação em ambientes protegidos, apresentando potencial de produção com qualidade e economia de insumos, quando comparada com outros sistemas de irrigação. Contudo, a restrição da disponibilidade de equipamentos de subirrigação no mercado dificulta sua difusão e emprego pelos produtores no Brasil.

#### **4.2.2. Automação e controle**

O manejo da subirrigação é fundamental para a qualidade das plantas, além de racionalizar o uso da água evita também o desperdício de insumos, e ainda reduz custos operacionais e aumenta a vida útil do sistema de irrigação (VIVECITRUS, 2012). O manejo hídrico nutricional das plantas nas mesas de subirrigação se dá principalmente pelo controle da altura da lâmina de SN no interior da mesa, do tempo de contato da SN com as plantas, que são dependentes do poder de absorção e de capilaridade do meio de crescimento da cultura. Assim, os principais componentes que interferem no manejo em relação às características de

uma mesa de subirrigação são o sistema de adução e drenagem da SN, e o momento de ligar e desligar a motobomba.

Uma das formas mais eficazes para reduzir o custo operacional em ambientes protegidos é automatizar as atividades envolvidas no sistema de produção, principalmente, a irrigação, que é uma atividade diária com participação efetiva nos custos de mão de obra e insumos. Thomas et al. (2009), realizando pesquisas em ambientes protegidos, levantaram uma serie de informações a respeito da automação em ambientes protegidos, concluíram que o uso da automação reduziu os custos de produção devido ao melhor aproveitamento da água e nutrientes pelas plantas, com diminuição do trabalho manual, além de beneficiar o meio ambiente por gerar menos desperdício e perdas.

As pesquisas de Thomas et al. (2009), mostraram que os produtores que utilizam automação nos sistemas de irrigação como, irrigação por gotejamento e mesas de subirrigação, reduziu a mão de obra em 35%, e para produtores que utilizavam outros sistemas de irrigação a automação gerou uma economia de 60%. Para uma área de 20.000 m<sup>2</sup> de ambientes protegidos, a economia de trabalho pode chegar a 6 horas por dia por funcionário com a automatização dos sistemas de irrigação. Os resultados mostram que os produtores podem economizar até 60% de fertilizantes por ano, quando aplicado água conforme a necessidade da planta, principalmente, quando se usa mesas de subirrigação com recirculação da SN. A pesquisa também mostrou que a adoção da automação, pelos produtores de ambientes protegidos dos EUA, pode dar o retorno do investimento em 1,5 a 2 anos.

Em mesas de subirrigação automatizadas, pode haver uma economia de 90% da mão de obra comparada com o sistema de irrigação por aspersão convencional. As mesas automatizadas também permitem um crescimento de 5 a 10% mais rápido das culturas, além de aumentar a sua qualidade, quando comparada com outros sistemas de irrigação. Esse sistema pode gerar uma economia de água de 30 a 80%, e de 50 a 90% de fertilizantes. As mesas também permitem irrigar culturas plantadas em recipientes de todos os tamanhos, e durante todo seu ciclo de produção (BEYTES, 2009).

Segundo Nemali & Van Iersel (2006), ainda não existe um sistema automático de irrigação que fornece à planta a quantidade exata de água, para que ela obtenha seu rendimento máximo. Esses autores, em estudos com automação para o controle do estresse hídrico em plantas em vasos com sensores de umidade, encontraram que os sensores

controlaram a taxa de estresse hídrico da planta, e concluíram que, diferentemente de outros sistemas, nesse houve pouco ou nenhum desperdício de água.

Para automatizar os processos em mesas de subirrigação, Ferrarezi & Van Iersel (2011), também estudaram o desempenho de sensores de umidade, e concluíram que os sensores capacitivos recomendados para uso em solo podem ser utilizados tanto para monitorar e controlar o conteúdo de água no substrato, como permitir um melhor controle da irrigação em sistemas de subirrigação, porém ressaltam que se deve verificar a viabilidade econômica do uso dessa tecnologia.

Outra opção para a automação do controle da lâmina de água nas mesas de subirrigação é o emprego de sensores de nível de água. O controle da umidade no meio de cultivo em recipientes de produção em uma mesa de subirrigação está relacionado com a altura da lâmina de água no interior da mesa e o tempo de permanência da lâmina em contato com as plantas, assim, o emprego de um controlador automático de nível pode permitir aos produtores o controle da quantidade de SN fornecida às plantas,. Pinto et al., (2011), estudando a aplicação de sensores de nível capacitivo para melhoria da leitura do irrigômetro, concluíram que esses sensores apresentam várias aplicações, principalmente, quando se deseja medir nível de líquidos em pequenos reservatórios. Luz (2011) utilizou sensores de nível para controlar o volume de água aplicado na irrigação da cultura do arroz em Santa Maria, RS, e constatou que o uso desse equipamento foi mais preciso que o sistema convencional de quantificação do volume de água, verificando também, que os vertedores de água que operavam sem o sensor, promoviam maior variação do nível de água, requerendo tempo e mão de obra dos produtores nas anotações do volume de água a ser aplicado.

A automação dos sistemas de irrigação em ambiente protegido, em particular a subirrigação, se faz necessária, pois além de aumentar a precisão e a qualidade do fornecimento de água e nutrientes às plantas, aumentando, conseqüentemente, a qualidade da produção, ela diminui o requerimento de mão de obra e os custos relacionados a esse fator. Dessa forma, o alto custo do investimento inicial da automação pode ser compensado com a redução dos custos da mão de obra, que cada vez é mais escassa e com custos elevado devido a sua demanda.

### 4.3. Projetos de engenharia

Para se alcançar os objetivos propostos para essa pesquisa de projetar e construir um equipamento de subirrigação é necessário adotar conceitos e critérios de projetos de engenharia, como base para o projeto adequado desse trabalho.

*“a missão do engenheiro é encontrar soluções para problemas técnicos. Para tanto ele se baseia em conhecimentos das ciências naturais e da engenharia e leva em conta os condicionantes materiais, tecnológicas e econômicas, bem como restrições legais, ambientais e aquelas impostas pelo ser humano.” (PAHL et al., 2005).*

Projetos de engenharia podem ser definidos como a invenção ou criação de dispositivos ou sistemas que não existem, ou ainda, como melhorias de dispositivos já existentes, realizadas a partir de tecnologias conhecidas, para satisfazer as necessidades humanas e resolver problemas da sociedade (KHANDANI, 2005). Esses projetos muitas vezes não seguem os caminhos padrões da pesquisa científica, pois a hipótese de um projeto de engenharia é validada após a realização de muita pesquisa exploratória (ANTONSSON, 1987). Assim, para desenvolver um projeto adequado é necessário seguir um processo, uma metodologia, etapas, para resolução do problema, que pode ser realizado por um engenheiro, onde,

O processo para desenvolvimento de um projeto de um equipamento envolve etapas que podem exigir um retrocesso na sua execução e a interação entre as etapas, para se ter o melhor resultado. Resolver um problema de projeto é um processo duvidoso, e as soluções estão sujeitas a complicações e mudanças imprevistas, que surgem ao longo do processo.

Segundo Khandani (2005), as etapas existentes em um processo de projeto de engenharia, e que devem ser cumpridas para ser atingido o objetivo, são ilustrados na Figura 3 sendo que esse percurso pode ser feito mais de uma vez, para se encontrar a melhor solução possível. As etapas desse esquema são detalhadas a seguir:

- *Definição do problema:* o problema a ser trabalhado deve ser definido de forma clara e inequívoca, sendo necessário identificar e estabelecer a necessidade humana, como a

necessidade de um novo sistema, produto ou máquina, e definir o problema conforme a necessidade.

- *Levantamento de informações pertinentes:* é necessário coletar informações disponíveis que estejam envolvidas com o problema, permitindo a visualização clara do problema.
- *Gerar múltiplas soluções:* é preciso gerar ideias ou soluções que possam resolver o problema, aliando a aplicação de regras e teoria, com a criatividade, que é parte fundamental dessa etapa.
- *Analisar e selecionar uma solução:* Após a geração das soluções é necessário avaliar com critérios técnicos essas soluções, e depois analisar e decidir pela solução mais adequada para a resolução do problema.
- *Testar e implementar a solução:* essa é a etapa onde serão ensaiados, construídos e fabricados a solução para o problema.



**Figura 3. Diagrama das etapas do processo para a resolução de um problema em projetos de engenharia. (Fonte: Adaptado de KHANDANI, 2005).**

Segundo Shigley et al. (2005), projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema. Se tal plano resultar na criação de algo que tem uma realidade física, então o produto deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável. Esses termos foram definidos da seguinte forma:

- *Funcional:* O produto deve apresentar um desempenho que atenda às necessidades e expectativas do consumidor.

- *Seguro*: O produto não deve oferecer perigo ao usuário, a circundantes ou a propriedades vizinhas. Perigos que não podem ser "evitados por projeto" devem se valer de anteparos (envoltórios protetores); se isso não for possível, informações apropriadas ou avisos devem ser fornecidos.
- *Confiável*: Confiabilidade é a probabilidade condicional, a um determinado nível de confiança, de que o produto irá desempenhar sua função proposta satisfatoriamente, ou sem falhar a uma determinada idade.
- *Competitivo*: O produto deve ser um forte competidor em seu mercado.
- *Utilizável*: O produto deve ser "amigável ao usuário", acomodando-se a especificações como tamanho, resistência, postura, alcance, força, potência e controle humanos.
- *Manufaturável*: O produto deve ser reduzido a um número "mínimo" de componentes, adequados à produção em massa, com dimensões, distorção e resistência sob controle.
- *Vendável*: O produto pode ser comprado, e serviços de assistência técnica devem estar disponíveis.

Portanto, o desenvolvimento de um equipamento de subirrigação requer a utilização de uma metodologia de projetos de engenharia, que forneça o embasamento necessário para se obter um produto final adequado que atenda as necessidades do produtor agrícola e que possa ser inserido no mercado.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

Para projetar um equipamento de subirrigação este trabalho foi dividido nas seguintes etapas: levantamento de informações sobre equipamentos de subirrigação existentes no mercado nacional e internacional; caracterização e avaliação de equipamentos de subirrigação em operação em ambientes protegidos na região de Campinas, SP; projeto, construção e avaliação de uma mesa de subirrigação.

### **5.1. Levantamento de informações, avaliação e caracterização dos sistemas de subirrigação**

Devido à pouca quantidade e baixa divulgação de informações técnicas de equipamentos e sistemas de subirrigação, principalmente sobre as características operacionais em ambientes protegidos no Brasil, foram realizadas pesquisas e coletadas informações sobre esses sistemas no mercado nacional e internacional, dos principais fabricantes e representantes comerciais.

#### **5.1.1. Levantamento de informações**

Em função dos poucos dados bibliográficos disponíveis e buscando obter maiores subsídios sobre a aplicação comercial da subirrigação foram também realizadas visitas técnicas nas seguintes empresas: James Greenhouse, na cidade de Colbert, estado da Georgia, EUA (produção de flores com mesas de subirrigação) (JAMES GREENHOUSES, 2012), atividade realizada pelo aluno de doutorado Rhuanito Soranz Ferrarezi que desenvolve trabalhos nessa área dentro do Grupo de Pesquisa Tecnologia de Irrigação e Meio Ambiente; International Paper Brasil, na cidade de Mogi Guaçu, SP (produção de mudas de eucalipto com mesas de subirrigação) (INTERNATIONAL PAPER BRASIL, 2012); Geraldo Barentse plantas ornamentais do Sítio KiFlor, na cidade de Holambra, SP (produção de flores com manta capilar) (GERALDO BARENTSE, 2012); Terra Viva, na cidade de Holambra, SP (produção de mudas de tomates com mesas de subirrigação) (TERRA VIVA, 2012); Sítio Kolibri, na cidade de Holambra, SP (produção de orquídeas com barra de irrigação juntamente

com um tecido capilar) (SITIO KOLIBRI, 2012); TropClima equipamentos para estufas agrícolas, na cidade de Holambra, SP (fabricante de bancadas de cultivo) (TROPCLIMA ESTUFAS, 2012); Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras/MG, visita ao módulo experimental de subirrigação, na cidade de Lavras, MG (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA, DEG UFLA, 2012) (Tabela 14, Anexo I).

Essas visitas tiveram como objetivos: levantar informações técnicas sobre os sistemas em operação, dos critérios para a construção dos equipamentos; verificando limitações e vantagens dos sistemas e as formas de operação, dimensões dos equipamentos de subirrigação, sua aplicabilidade e características, bem como a configuração de funcionamento quanto a:

- Automação do sistema;
- Realização e reuso da SN;
- Manejo da irrigação;
- Material de construção das mesas e bancadas de irrigação;
- Formas de operação do sistema, principalmente, os princípios de enchimento e de drenagem da SN no equipamento;
- Estado de conservação dos equipamentos, observando a existência de corrosões, desgastes, vazamentos.

Os dados obtidos nessa etapa foram tabulados de acordo com os tipos de equipamentos encontrados, suas dimensões, formas construtivas, tipo de material, aplicabilidade e a forma de operação. As análises desses dados auxiliaram nas definições de critérios de projeto para a construção da mesa de subirrigação (Tabela 14) Anexo I.

### **5.1.2. Avaliação e caracterização do sistema de subirrigação**

Foi realizado um aprofundamento das informações sobre os equipamentos em operação e, assim, obter maiores informações sobre o seu desempenho e também sobre as condições operacionais específicas. Essa avaliação também teve o objetivo de fundamentar os critérios de projetos que seriam utilizados na concepção do novo equipamento. Após a realização de uma pesquisa sobre sistemas que estavam em operação na região de Campinas, decidiu-se por avaliar o sistema de subirrigação utilizado nos viveiros de mudas da empresa

International Paper do Brasil, localizado na cidade de Mogi Guaçu, SP, devido a sua tradição na área, a importância econômica da atividade e pelo interesse da empresa nessa avaliação.

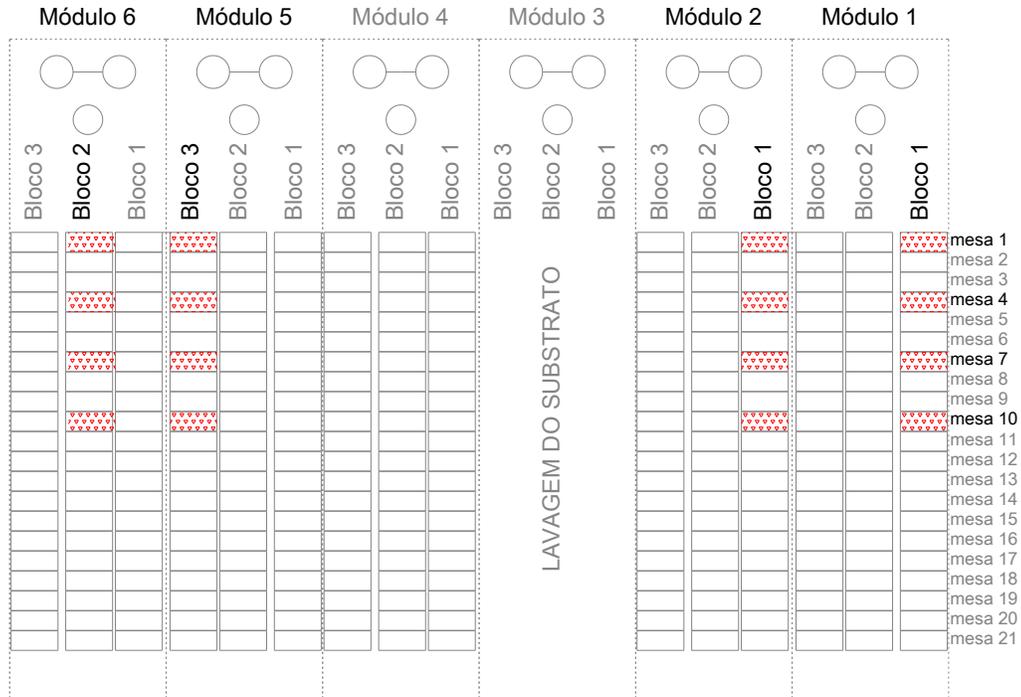
A avaliação do sistema de subirrigação foi dividida em etapas que para aferir seu desempenho. Inicialmente, foi realizada a caracterização do sistema, detalhando os módulos operacionais e as mesas de subirrigação. Posteriormente, foi realizado um levantamento da forma de operação dos sistemas de adução e drenagem dos módulos, e, finalmente caracterizado o manejo da irrigação da cultura.

De posse dos dados da caracterização da operação do sistema, planejou-se e definiu-se a metodologia de avaliação, com a determinação do balanço da SN no sistema, com a medição do volume e tempo de adução e drenagem, volume de solução armazenado pelo substrato, estimativas da evapotranspiração da planta e perdas do sistema. Finalmente, procedeu-se a avaliação e o cálculo dos parâmetros de interesse, quantificando as componentes de eficiência para a mesa, para o módulo, e estimando o consumo de SN pelo sistema.

#### **5.1.2.1. Composição e operação do sistema de subirrigação**

O sistema de subirrigação avaliado foi construído há, aproximadamente 10 anos, sendo composto por seis módulos de irrigação com bombeamento independente, distribuídos em nove estufas de 29,30 x 6,34 m, totalizando uma área de produção de 1.670 m<sup>2</sup> (Figura 4). Cada módulo era constituído por três blocos com 21 mesas de subirrigação dispostas sobre trilhos, abastecidos por três reservatórios de SN, dois com volumes de 7.000 L e outro de 5.000 L.

Cada equipamento de irrigação era composto por 4 partes: uma mesa de subirrigação, construída em chapa de alumínio com dimensões de 2,85 x 1,19 x 0,09 m, suporte das bandejas, suporte de mesas e os trilhos de movimentação. A movimentação das mesas sobre trilhos era na direção do comprimento das estufas, facilitando o trabalho dos operários no manejo da cultura, permitindo ocupar o espaço de produção de forma mais eficiente.



**Figura 4. Layout de identificação das posições dos módulos, blocos de mesas e mesas selecionadas para avaliações.**

A SN era conduzida dos reservatórios para as mesas por uma tubulação de PVC com DN50. Ao longo das tubulações de cada bloco havia 21 saídas para a adução da SN nas mesas, controladas por meio da abertura e fechamento de válvulas solenoides, sendo que, enquanto uma válvula era aberta para a adução, as outras duas válvulas permaneciam fechadas, irrigando um bloco de mesas por vez dentro de cada módulo (Figura 5 A).

A drenagem das mesas ocorre no mesmo lado da adução, onde havia 104 orifícios com diâmetros de 0,4 cm localizados na parte inferior da mesa, que totalizava uma área de 13,07 cm<sup>2</sup>, para evitar o entupimento dos orifícios. Abaixo dos orifícios existia um pequeno reservatório que acumulava SN drenada, onde a vazão era limitada a passar por um único orifício com diâmetro de ½” (12,7 mm) com área de 4,91 cm<sup>2</sup>. A SN drenada era recolhida por uma calha, e direcionada para uma única tubulação de drenagem onde retornava aos reservatórios para reutilização (Figura 5 B).



**Figura 5. Ilustração do sistema de adução (A) e de drenagem (B) das mesas de subirrigação.**

A fertirrigação, ou aplicação da SN era realizada todos os dias da semana a cada 2 horas, no período das 7:00 às 17:00 horas, totalizando 6 aplicações por dia por mesa. Os reservatórios de cada módulo eram reabastecidos a cada 2 dias com um volume médio de 2.500L de SN, para repor o volume consumido pelas plantas e perdido pelo sistema. A SN dos reservatórios era trocada a cada 15 dias, sendo que a solução descartada era destinada a uma estação de tratamento da empresa. Assim, o sistema disponibilizava um total de 36.500L de solução nutritiva no período de 15 dias em cada módulo.

#### **5.1.2.2. Metodologia de avaliação do sistema**

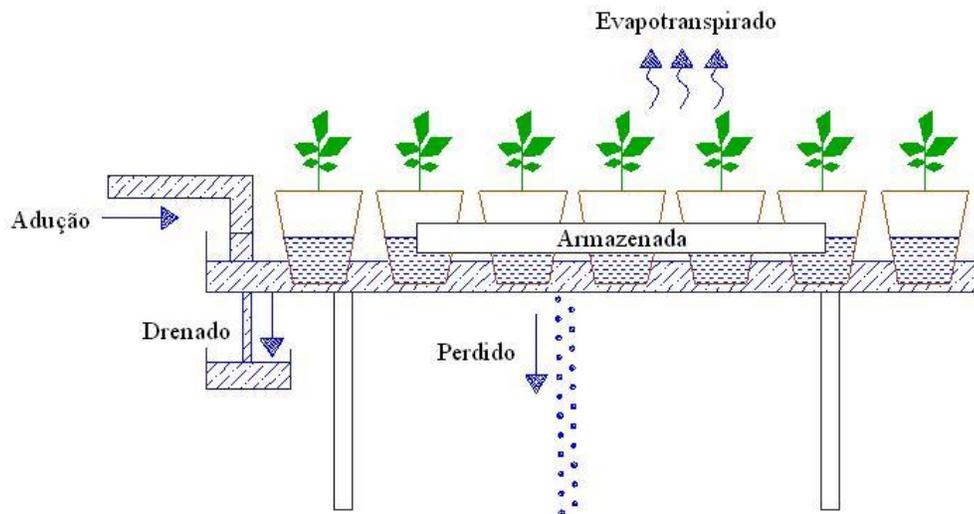
Foram selecionados 16 mesas ou pontos de avaliação nos módulos de irrigação, sendo essa escolha realizada a partir de uma adaptação da metodologia utilizada por Keller & Karmeli (1975) para avaliação em sistemas de irrigação por gotejamento., Conforme mostra a Figura 4, foram selecionados quatro módulos (1, 2, 5 e 6), um bloco de mesas por módulo, e quatro mesas dentro do bloco, totalizando 16 mesas.

Todas as mesas selecionadas estavam localizadas na primeira metade do bloco, considerando a existência de uma simetria com a segunda parte, uma vez que a tubulação de adução chegava pela parte mediana do bloco e se dividia em duas, direcionadas uma para cada extremidade do bloco. Foram selecionadas as seguintes mesas, 1, 4, 7 e 10, representando a

localização da primeira posição, a 1/3, a 2/3 e a 3/3 (última). Os módulos selecionados foram os de número 1, 2, 5 e 6, com os blocos 1, 1, 3 e 2, respectivamente para cada módulo.

Para determinar os parâmetros de eficiência da mesa de subirrigação e do sistema, buscou-se medir as variáveis que caracterizam o balanço hídrico do sistema (Figura 6). Foi medido o volume e o tempo de adução e de drenagem e o volume de SN armazenado no tubete. Foi estimado o valor médio de evapotranspiração diária das mudas de eucalipto, sendo que as perdas totais de SN na mesa e no sistema foram calculadas indiretamente pela diferença dos valores do volume de entrada e saída de SN.

Em cada módulo, o volume de adução foi medido em quatro mesas, utilizando-se de um hidrômetro na tubulação de entrada de cada mesa (2 hidrômetros da marca Tecnobrás e 2 hidrômetros da marca Itrón). O tempo de adução foi cronometrado com um cronometro digital durante o evento de irrigação e a vazão de adução em cada mesa foi obtida pela relação entre os valores do volume e os tempos obtidos, de acordo com a Equação 1.



**Figura 6. Esquema das componentes do balanço de SN na mesa de subirrigação.**

$$Qa_m = \frac{Va_m}{Ta_m}$$

**Equação 1**

em que:

$Qa_m$  – Vazão média de adução de SN na mesa em um evento de irrigação ( $L \text{ min}^{-1}$ );

$Va_m$  – Volume de adução de SN na mesa em um evento de irrigação (L);

$Ta_m$  – Tempo de adução de SN na mesa em um evento de irrigação (min);

Em cada mesa foi coletado o volume e quantificado o tempo de drenagem para obtenção da vazão de drenagem. O volume drenado foi recolhido simultaneamente nas quatro mesas selecionadas de cada módulo a cada 2 minutos, permitindo determinar a vazão nesses intervalos e a vazão média drenada de todo o volume de SN (SN) na mesa. O intervalo de coleta de 2 minutos foi estabelecido para observar a variação da carga hidráulica no interior da mesa, que modificava o valor da vazão de drenagem da mesa em função do tempo.

Em cada mesa avaliada foram selecionados 15 tubetes com plantas e, com o auxílio de uma balança portátil (Kern modelo EMB 600-2, 0,01g) foram pesados antes e depois da irrigação. A diferença entre os valores da massa nesses dois momentos permitiu a determinação da quantidade de água armazenada no substrato em cada tubete em um evento de irrigação, o valor médio de cada tubete multiplicado pelo número de tubetes de uma mesa (600) permitiu determinar o volume de SN armazenado na mesa de subirrigação ( $V_{sm}$ ).

O valor da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) no interior da estufa foi assumido em  $2,3 \text{ mm dia}^{-1}$  de acordo com Fernandes et al. (2004) e Farias et al. (1994), e o valor do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) foi estabelecido como 1 para a cultura de mudas de eucalipto (ALLEN et al., 1998). Multiplicando os valores de  $ET_0$  e  $K_c$ , que representa a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), pela área de uma mesa ( $3,4 \text{ m}^2$ ) e dividido por 10 horas (tempo médio de evapotranspiração por dia), obteve-se o volume evapotranspirado potencial da cultura por mesa por hora (Equação 2).

$$V_{ET} = \frac{(K_c \times ET_0) \times Ar}{NHSD} \quad \text{Equação 2}$$

em que:

$V_{ET}$  – Volume evapotranspirado de água nas mudas de eucalipto por mesa de subirrigação em uma hora (L);

$K_c$  – Coeficiente da cultura (adimensional);

$ET_0$  – Evapotranspiração de referência (mm);

$Ar$  – Área do reservatório (mesa de subirrigação) ( $\text{m}^2$ );

$NHSD$  – Número de horas de sol por dia ( $\text{h dia}^{-1}$ );

O volume de SN perdido no processo de uma irrigação foi estimado a partir da diferença do volume aduzido e o volume drenado, armazenado e evapotranspirado na mesa (Equação 3).

$$Vp_m = Va_m - (Vd_m + Vs_m + V_{ET}) \quad \text{Equação 3}$$

em que:

$Vp_m$  – Volume perdido de SN na mesa em um evento de irrigação (L);

$Vd_m$  – Volume drenado de SN na mesa em um evento de irrigação (L);

$Vs_m$  – Volume armazenado de SN na mesa em um evento de irrigação (L);

Durante as avaliações nas mesas foi medida, com auxílio de um paquímetro, a altura máxima que a SN alcançou no tubete ao término da adução, a altura foi considerando a partir da parte basal do tubete. Com o auxílio de um cronometro, também foi determinado o tempo de contato dos tubetes com a SN, que se iniciava no momento em que a SN tocava a base dos tubetes e finalizava quando a solução deixava de ter contato com os tubetes.

Com a determinação das variáveis mencionadas foi possível calcular as porcentagens de SN drenada, evapotranspirado, armazenada e perdida para cada mesa avaliada, permitindo estimar os seguintes parâmetros de eficiência (HEERMANN & SOLOMON, 2007).

- Eficiência de armazenamento da SN na mesa em um evento de irrigação ( $E_{S_m}$ ) (Equação. 4):

$$E_{S_m} = \frac{V_{S_m}}{V_{a_m}} \quad \text{Equação 4}$$

- Eficiência de aplicação da SN na mesa em um evento de irrigação ( $E_{A_m}$ ) (Equação 5):

$$E_{A_m} = \frac{(V_{S_m} + V_{ET})}{V_{a_m}} \quad \text{Equação 5}$$

- Eficiência de irrigação da SN na mesa em um evento de irrigação ( $E_{I_m}$ ) (Equação 6):

$$EI_m = \frac{(Vs_m + V_{ET} + V_{d_m})}{Va_m} \quad \text{Equação 6}$$

• Porcentagem de perdas da SN na mesa em um evento de irrigação ( $PP_m$ ) (Equação 7):

$$PP_m = \frac{V_{p_m}}{Va_m} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Além dos parâmetros de desempenho de cada mesa também foram determinados os parâmetros de eficiência de cada módulo de irrigação considerando o funcionamento dos três blocos de mesas, totalizando 63 mesas por módulo ( $N_{m_{mód}}$ ) para o período total de irrigação de 15 dias (PI), com a frequência de 6 irrigações diárias ( $NI_d$ ). Estimou-se o volume total de SN utilizado no período de irrigação para cada módulo, (volume inicial de 19.000 L –  $V_i$ ; volume de reposição de 2.500 L –  $V_r$  com frequência de reposição a cada 2 dias –  $Fr$ ; volume total disponibilizado de 36.500 L) que foi dividido nas componentes de volume consumido (volume armazenado nos tubetes, evapotranspirado pelas plantas e perdido nas mesas) e volume perdido (volume perdido no transporte de SN e volume descartado após o período de irrigação). Assim, foram determinados os seguintes parâmetros de eficiência para cada módulo:

• Eficiência de armazenamento no módulo de irrigação ( $Es$ ) (Equação 8):

$$ES = \frac{(PI \times N_{m_{mód}} \times NI_d) \times Vs_m}{\{Vi + [Vr \times (PI - Fr)]\}} \quad \text{Equação 8}$$

em que:

PI – Período de irrigação (dias);

$N_{m_{mód}}$  – Número de mesas no módulo de irrigação;

$NI_d$  – Número de irrigações diária no módulo;

$V_i$  – Volume inicial de SN disponibilizado para o módulo de irrigação (L);

$V_r$  – Volume médio de reposição de SN no módulo de irrigação (L);

$Fr$  – Frequência de reposição no módulo de irrigação (dias);

- Eficiência de irrigação no módulo de irrigação (EI) (Equação 9):

$$EI = \frac{(PI \times Nm_{\text{mód}} \times NI_d) \times Va_m + (PI \times Nm_{\text{mód}} \times NI_d) \times Vs_m}{\{Vi + [Vr \times (PI \div Fr)]\}} \quad \text{Equação 9}$$

- Porcentagem de perdas no módulo de irrigação (PP) (Equação 10):

$$PP = \frac{(PI \times Nm_{\text{mód}} \times NI_d) \times Vp_m + Ptd}{\{Vi + [Vr \times (PI \div Fr)]\}} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

em que:

Ptd – Perdas por transporte da SN e do descarte no final do período de irrigação no módulo (L);

Os dados coletados foram tabulados e submetidos à análise estatística de média e desvio padrão, assim como foi realizado os cálculos de eficiência e perdas do sistema para verificar o desempenho do mesmo.

## 5.2. Projeto do equipamento de subirrigação

A validação da hipótese dessa pesquisa requer a elaboração de critérios que serão atendidos na execução do projeto e aplicados na construção da mesa de subirrigação, visando atender as necessidades básicas de um projeto de engenharia. A partir dos critérios propostos, foi realizado o dimensionamento da mesa de subirrigação utilizando-se de simulação e que, posteriormente foi avaliada.

### 5.2.1. Definição e caracterização dos critérios

Para a definição dos conceitos e parâmetros que foram utilizados nessa fase da pesquisa partiu-se dos critérios de projeto, que segundo Khandani (2005) são requeridos para o desenvolvimento de equipamentos que atendem os princípios de engenharia. Foi realizada uma combinação dos critérios requeridos para projetos e das necessidades e requerimentos específicos de uma mesa de subirrigação, definidos após a realização de um levantamento

inicial de informações. Dessa forma os critérios adotados foram classificados em: funcionalidade, ergonomia e material de construção, que serão discutidos a seguir.

#### **5.2.1.1. Funcionalidade**

A funcionalidade, definida como um potencial de uso do equipamento, é um dos critérios essenciais de projeto, que exige a caracterização do local de instalação, a forma de operação e o uso das mesas de subirrigação em ambiente protegido. Para atender esse critério e possibilitar o uso para diferentes módulos de estufas, tipos de manejo e dimensões de recipientes para o equipamento, foi realizado o levantamento das dimensões dos módulos comerciais de ambiente protegido (estufas, viveiros, casa de vegetação) em sete empresas no Brasil, e das dimensões das bandejas e vasos de produção comercial em 12 empresas, auxiliando assim, na tomada de decisão para definição das dimensões da mesa de subirrigação. Os valores das dimensões de comprimento e largura dos módulos de estufas que foram encontrados no mercado nacional para a determinação das dimensões da mesa estão descritos na Tabela 18 do Anexo I.

Verificou-se que o mercado disponibiliza diferentes dimensões de estruturas para serem utilizadas na produção em ambientes protegidos, sendo que o valor da largura varia de 5,0 a 10,0 metros e o comprimento de 3,0 a 4,5 m. Essa diversidade de dimensões permite que as áreas de produção em ambientes protegidos sejam montadas em módulos tanto no sentido do comprimento como na largura, não havendo um valor limite ou restrição. Assim, essa característica determina uma restrição na definição de uma dimensão padrão da mesa de subirrigação, pois cada projeto do sistema de produção é específico para cada propriedade, exigindo um estudo para se determinar o comprimento adequado das mesas para cada condição.

Outro fator que também afeta a definição das dimensões das mesas de subirrigação são as dimensões comerciais dos recipientes de produção, de forma a possibilitar a máxima ocupação da área da mesa. As dimensões comerciais dos recipientes comercializados por 12 empresas brasileiras pesquisadas são apresentadas na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 no Anexo I, onde se observa a elevada variação nas dimensões das bandejas de 128%, 184% e 432% para largura, comprimento e altura, respectivamente, em relação ao menor valor, e de

398% e 422%, para diâmetro e altura, respectivamente para os vasos. Esses valores limitam também o estabelecimento de um tamanho padrão da mesa de subirrigação de forma a possibilitar o máximo aproveitamento do espaço ocupado pelos recipientes.

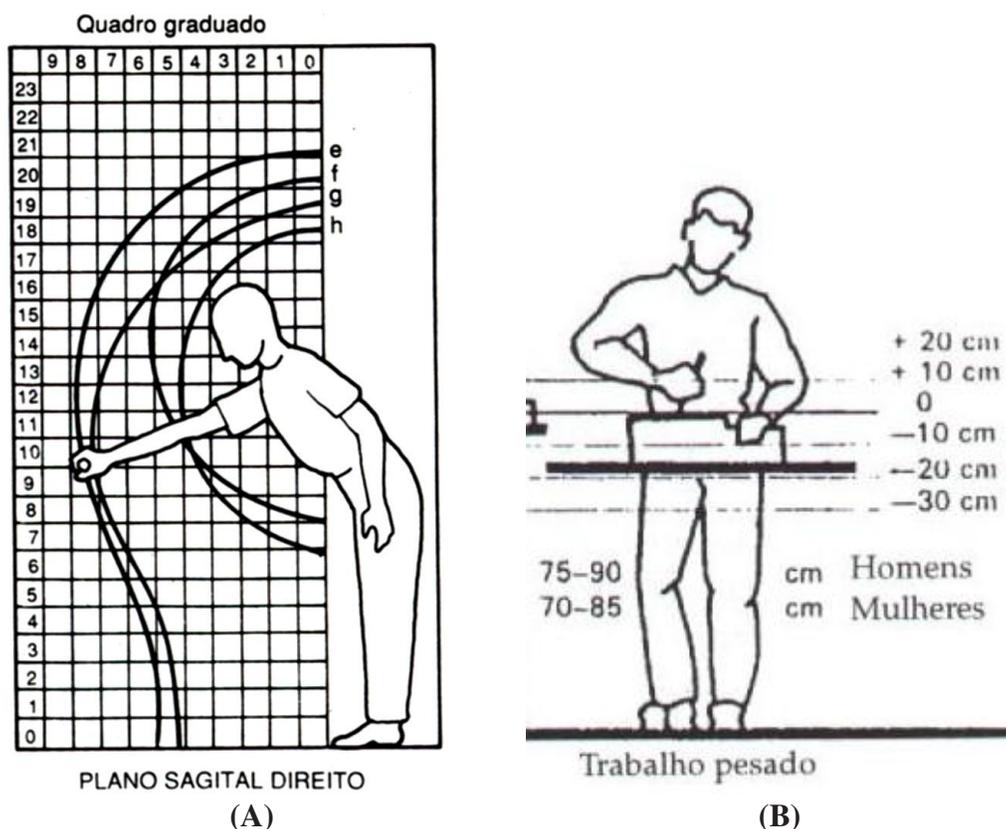
Outro fator considerado no critério de funcionalidade foi à possibilidade das mesas de subirrigação operarem fixas ou móveis no sistema de produção. As mesas fixas apresentam menor aproveitamento de ocupação da área das estufas, requerendo áreas de corredores entre elas, para que seja realizado o manejo da cultura pelos operários. Por outro lado, as mesas móveis permitem uma maior ocupação da área da estufa e uma maior produção por área (ROUPHAEL et al., 2006), podendo ser transportadas e manejadas para outros setores dos ambientes protegidos, possibilitando a criação de uma linha de produção, não exigindo área de corredores, pois quando há necessidade de um espaço entre as mesas para o manejo da cultura, os operários podem movê-las para os lados formando um corredor entre elas. No entanto, na construção do protótipo da mesa de subirrigação optou-se por instalações de mesas fixas, pela restrição de recursos e pela limitação de espaço na estufa.

#### **5.2.1.2. Ergonômico e segurança**

Segundo a NR17/Ergonomia (2012) item 17.3.2, todo trabalho manual que tenha que ser realizado em pé, como bancadas, mesas, escrivaninhas e painéis, devem proporcionar ao trabalhador condições de boa postura, visualização e operação. Dessa forma, atendendo essa norma, a altura e largura da mesa foram definidas atendendo as medidas antropométricas médias de um trabalhador brasileiro (ILDA, 1992), sendo o limite de largura da mesa baseado no alcance máximo de um trabalhador sobre uma bancada realizando trabalhos com precisão e esforço mediano (Figura 7 A), e a altura da mesa na altura ideal de trabalho de um operário brasileiro (Figura 7 B).

A partir das medidas ergonômicas antropométricas médias foi estabelecido que o alcance máximo de um operário brasileiro sobre uma bancada no plano sagital, pode alcançar o valor próximo de 0,90 m, com altura de 1,20 m. No entanto, para trabalhos pesados a altura recomendada para homens é de 0,75 a 0,90 m, e para mulheres é de 0,70 a 0,85 m. Assim, foi estabelecida uma altura de 0,80 m, que corresponde do chão até a superfície de trabalho (fundo

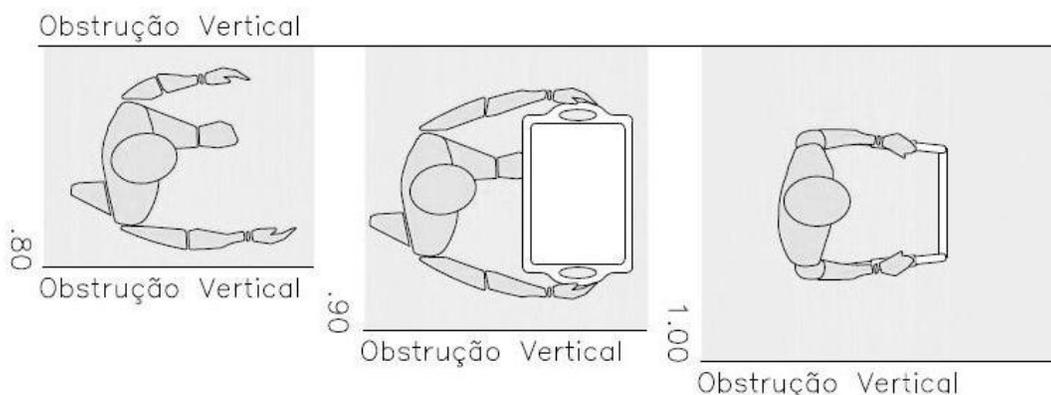
da mesa), que atende trabalhadores de ambos os sexos, sendo que nessa altura o alcance máximo no plano sagital é de 0,80 m (Figura 7).



**Figura 7. Esquema do alcance médio da mão no plano sagital direito (A), e altura ideal de trabalho pesado de um operário brasileiro (B). (Fonte: ILDA, 1992).**

Na definição da dimensão do comprimento da mesa foi levada em consideração a largura mínima do corredor para a movimentação dos operários, localizado entre a mesa e o limite da estufa. Como a largura ergonômica do corredor para movimentação de um operário com cargas é de 0,90 m (Figura 8), adotou-se esse valor no projeto (BOUERI FILHO, 2008).

Outro critério de ergonomia física adotado foi o de proporcionar segurança ao operário, evitando acidentes ou danos físicos, requerendo a vedação nos cantos com a presença de quinas cortantes na mesa de subirrigação (ILDA, 1992).



**Figura 8. Padrões de valores de largura do corredor para a movimentação de pessoas (Fonte: BOUERI FILHO, 2008).**

### 5.2.1.3. Seleção do material de construção e método de fabricação

O material a ser selecionado para a construção da mesa deve possuir características que atendam a funcionalidade e a ergonomia do projeto. Primeiramente, o material deve ser leve e resistente para suportar o peso da SN, recipientes e plantas, e permitir a sua movimentação com facilidade e sem muito esforço do operador. Além disso, o material de construção da mesa não pode sofrer corrosões quando em contato com a SNSN, e nem liberar substâncias tóxicas, que contaminem as plantas ou o solo e o lençol freático, quando descartada no meio ambiente.

Outras características que material selecionado deve atender é a sua disponibilidade no mercado nacional, o seu custo, facilidade do método de fabricação, e que apresente uma relação custo/benefício adequada para a sua produção. Para a seleção do material de fabricação da mesa de subirrigação foram analisadas as características dos materiais utilizados em mesas e bancadas de irrigação existentes comercialmente tanto no Brasil como no Exterior. Os principais materiais utilizados no Brasil, EUA e Europa são: plásticos (polietileno - PE, poliestireno – PS e poliestireno de alto impacto – PSAI, polipropileno – PP, policloreto de vinila – PVC), e metais (alumínio e aço galvanizado). As principais características e propriedades desses materiais estão detalhadas a seguir.

#### Polietileno – PE:

As principais características do PE são: baixo custo, facilidade de ser trabalhado, isolante elétrico, atóxico, inodoro, boa resistência ao choque. No entanto, ele é inflamável,

sensível a radiação solar e sensível a fissuração sob tensão (SANTOS e MARTINS, 2010 e GORNI, 2012). Como o material da mesa deve ser resistente a esforços e não deformar com facilidade, esse material foi descartado como opção.

#### Poliestireno – PS:

As características do PS são: baixa retração na moldagem e fáceis de processar a um baixo custo, baixa densidade, elevada resistência à absorção de água e à difusão do vapor de água, baixa resistência a óleos e solventes orgânicos, à radiação solar, calor e intempéries, e boa resistência à tração e má resistência ao choque (SANTOS e MARTINS, 2010 e GORNI, 2012). Pela movimentação contínua e choques frequentes da mesa de subirrigação no processo de produção de mudas, a utilização do PS poderia possibilitar a fissura da mesa pela má resistência ao choque, o que eliminou a escolha desse material.

#### Poliestireno de alto impacto – PSAI:

A polimerização borracha-estireno resulta no Poliestireno de Alto Impacto (PSAI), um produto igual ao poliestireno, mas com propriedades mecânicas sob impacto superiores e com maior ductilidade com sua densidade variando de 1,04 a 1,07 g cm<sup>-3</sup>. O PSAI tem sido usado em processos de moldagem por injeção e por extrusão, sendo também aplicado na termoformagem ou moldagem a vácuo. O PSAI, por sua maior resistência ao impacto, é usado em peças de maior exigência física em relação ao PS (GRASSI et al., 2001). Essas características colocou o PSAI como uma dos possíveis materiais a serem utilizados na fabricação da mesa de subirrigação.

#### Polipropileno – PP:

Desse material se destacam as seguintes características: o baixo custo, elevada resistência química, exceto para ácidos oxidantes, fácil moldagem, alta resistência à fratura por flexão ou fadiga, boa resistência ao impacto acima de 15°C, boa estabilidade térmica, maior sensibilidade à luz UV e agentes de oxidação, sofrendo degradação com maior facilidade que o polietileno. É considerado o mais rígido entre os polímeros poliolefinicos e mantém esta característica se submetido a mais de 100°C, tem resistência à fluência superior ao polietileno de alta densidade possui resistência à abrasão e ao calor, com excelentes qualidades dielétricas e de isolamento. Entretanto, esse material possui uma colagem difícil, sendo permeável a gases e solventes orgânicos (SANTOS e MARTINS, 2010 e GORNI, 2012). Esse material foi descartado como opção na fabricação da mesa, por apresentar um ponto de amolecimento

baixo, ou seja, o polipropileno se deforma com facilidade quando submetido a cargas como o peso da água e vasos no interior da mesa de subirrigação, além de serem sensíveis a agentes de oxidação.

#### Policloreto de vinila – PVC:

É um material de elevada resistência química com capacidade de se misturar com aditivos, o que permite a produção de produtos com diferentes propriedades físicas e químicas. Em geral, as suas principais características e propriedades são: versatilidade, leveza (com densidade média de 1,4), o que facilita seu manuseio e aplicação, solidez e resistência a choques, impermeabilidade a gases e líquidos, boa resistência à abrasão, à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores, boa estabilidade dimensional, bom isolamento térmico, elétrico e acústico, sensibilidade ao choque a baixas temperaturas, não propagando a chama, quimicamente inerte à maioria dos produtos químicos, não resiste bem a temperaturas superiores a 70°C e decompõe-se a temperaturas superiores a 150 °C. Por outro lado, por ser um material sensível à radiação solar (SANTOS e MARTINS, 2010 e GORNI, 2012) o PVC foi descartado, pois em ambientes protegidos há alta incidência de radiação solar, o que poderia provocar redução na vida útil da mesa.

#### Alumínio:

As principais propriedades e características desse material são: baixo peso específico, resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, infinita reciclagem, vida útil alta, sendo facilmente trabalhado com amplas aplicações, o que torna o alumínio o metal mais consumido no mundo (ABAL, 2007). No entanto, esse material apresenta alto custo e maior densidade em relação aos materiais plásticos, com possibilidade de sofrer o processo de corrosão em contato constante com a SN.

#### Aço galvanizado:

É um material com boa durabilidade, alta resistência mecânica, baixo custo, resistente à corrosão, vida longa. No entanto, possui maior peso específico que os outros materiais descritos, tornando seu manuseio difícil e exigente em esforço manual (SILVA e FALDINI, 2012). Além disso, é de difícil conformação em relação aos demais materiais analisados.

Diante das características descritas e comparação entre os materiais, selecionou-se o poliestireno de alto impacto (PSAI) como o material para a construção da mesa de

subirrigação, por atender as condições requeridas, sendo um material facilmente encontrado no mercado brasileiro com flexibilidade para ser trabalhado em moldagem das peças.

A partir da escolha do material, optou-se pelo processo de fabricação de *vacuum forming* (termoformagem ou termomoldagem) para moldar as peças para a construção da mesa. Esse processo consiste em aquecer uma placa de plástico sobre um molde com o formato desejado da peça, e após a placa alcançar a temperatura de moldagem, ela é sugada na direção do molde por um vácuo, assumindo o formato do molde (SIMPLAST E AMIPLAST, 2013). Houve dificuldades para se definir o sistema de fabricação da mesa por serem peças com dimensões que exigia infraestrutura de alto custo para construir ou moldar as peças, e também para se encontrar uma empresa parceira, por serem peças com dimensões relativamente maiores que o padrão de mercado no processo de termoformagem, como vasos, potes, bandejas, baldes etc., e principalmente, por serem solicitadas poucas peças. Essas características fez que as maiorias das empresas contatadas não tivessem interesse em fazer os moldes e moldar as placas. No entanto, foi realizada uma parceria com a empresa Modelagem Ideal (MODELAGEM IDEAL, 2012), para a qual foi entregue o projeto da mesa, para a construção do molde e moldagem das peças.

Para a construção do suporte da mesa de subirrigação foi selecionado como material o alumínio, por apresentar características que combina resistência a esforços e leveza, uma vez que a mesa deve ser construída para suportar o peso dos recipientes de produção, SN e as culturas, e também para ser movimentadas por operários. Além disso, o alumínio também tem boa resistência a agentes de oxidação, uma vez que, apesar de não estar em contato direto com a SN, o suporte pode sofrer oxidação pelo contato indireto como evaporação da SN, respingos, possíveis vazamentos.

### **5.2.2. Projeto e dimensionamento da mesa de subirrigação**

A execução do projeto da mesa de subirrigação consistiu basicamente da aplicação dos critérios discutidos anteriormente visando o dimensionamento do sistema. Optou-se por dividir a execução do projeto do sistema de subirrigação nas quatro partes constituintes do sistema: o da mesa propriamente dito, da estrutura de suporte da mesa e dos sistemas de operação hidráulica e automação.

### 5.2.2.1. Projeto da mesa de subirrigação

Essa etapa consistiu basicamente da definição das dimensões da mesa, do seu material construtivo e da sua configuração física interna.

A dimensão da largura da mesa de subirrigação foi definida exclusivamente pelas medidas médias ergonômicas antropométricas de um trabalhador brasileiro, pois a variedade de recipientes de produção e de dimensões de módulos de ambientes protegidos limitou a definição de um padrão de largura, permitindo apenas a fixação de um valor máximo. A altura da mesa também foi definida a partir das medidas ergonômicas antropométricas.

A definição da altura da borda da mesa foi baseada na metade do valor da altura média dos vasos de produção pesquisados no mercado, uma vez que o umedecimento da parte superior do recipiente será realizado pelo princípio da capilaridade, não havendo a necessidade de sua completa imersão na SN, conforme mostra trabalhos apresentados por Barreto et al. (2012) em determinados tipos de substratos. Outro fator limitante na definição das dimensões da borda foi o processo de moldagem, pois bordas mais altas poderiam comprometer a qualidade da moldagem reduzindo a espessura do material nessa parte, ou encarecendo o processo se mantida a mesma qualidade. Adicionalmente, para aumentar a aplicabilidade da mesa, foi definida que as bordas deveriam ter uma inclinação, que atendessem o valor médio da inclinação dos vasos de produção pesquisados no mercado nacional, incrementando o número de recipientes a serem dispostos no seu interior.

Definiu-se também o PSAI como material de fabricação da mesa em função de suas características, facilidade de moldagem no sistema *vacuum forming*, e disponibilidade no mercado nacional.

Buscando atender a diversidade de dimensões dos módulos de ambientes protegidos existentes no mercado, foi estabelecido que a dimensão do comprimento da mesa fosse variável. Além disso, devido ao processo de fabricação e visando a sua viabilização a um custo menor, a mesa de subirrigação foi projetada para ser moldada e montada em três módulos: uma cabeceira ou extremidade inicial e outra final, e uma parte intermediária, que possibilita a montagem de diferentes comprimentos, dependendo do número de módulos montados e atendendo diferentes dimensões das áreas de produção.

Visando atingir processos de adução e drenagem rápidos e uniformes, a mesa foi projetada com canais de drenagem na sua superfície, no formato de drenos tipo “espinha de peixe”. A largura do canal de dreno foi definida a partir da metade do valor do diâmetro da parte basal do menor vaso de produção encontrado no mercado nacional, para permitir que os vasos não tenham o risco de virar no interior da mesa.

#### **5.2.2.2. Dimensionamento da estrutura de suporte**

A partir dos critérios analisados optou-se por utilizar o alumínio como material de construção dessa estrutura, por apresentar boa relação custo-benefício, boa resistência à corrosão e aos esforços de tração e compressão, devido a cargas que são submetidos.

Após a seleção do material, foi realizado um levantamento de custo do material a partir de uma cotação do preço por unidade de peso do alumínio em três empresas da região de Campinas, SP, também foi realizado um levantamento dos perfis comercial (Tabela 1) para realizar as simulações da deformação. A partir das dimensões e encaixes da mesa de subirrigação projetada foi realizado o dimensionamento da estrutura. Utilizando-se dos desenhos da mesa de subirrigação (Figura 29 Anexo II) projetou-se a estrutura de suporte da mesa (Figura 18), sendo os perfis de alumínio selecionados de acordo com simulações estruturais por cálculos realizados pelo software ANSYS Mechanical<sup>®</sup> (2010), buscando determinar as dimensões do perfil de alumínio com a menor deformação física e a melhor relação custo/benefício.

O critério adotado para a escolha do perfil foi à deformação estimada nas zonas críticas da estrutura submetida aos momentos de maiores esforços, ou seja, quando a mesa está preenchida completamente com água ou SN. O valor da carga total que a estrutura deve suportar foi calculado pelo somatório do peso da água na altura máxima de lâmina e o peso do material que foi construído a mesa e do peso próprio do perfil de alumínio, acrescidos por um coeficiente de segurança de 10%, sendo que foi considerada uma carga uniforme e estática.

Para se determinar o carregamento crítico na mesa foi calculado o volume máximo que a mesa suporta de água e o peso do poliestireno de alto impacto (PSAI) com peso específico de  $1000 \text{ kg}_f \text{ m}^{-3}$  e  $1070 \text{ kg}_f \text{ m}^{-2}$  respectivamente, resultando em um peso total que a estrutura deve suportar é de  $588 \text{ kg}_f$ , ou seja,  $70 \text{ kg}_f \text{ m}^{-2}$ .

**Tabela 1. Valores das dimensões dos perfis comerciais retangulares de alumínio adotados para simular a deformação da estrutura.**

Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
30,0	20,0	2,00
38,1	25,4	2,00
40,0	30,0	2,50
50,8	25,4	2,00
50,8	38,1	2,00
76,0	32,0	2,00
76,2	25,4	1,58
76,2	38,1	2,00
77,0	25,0	2,20
85,5	35,0	8,00
88,9	44,5	2,00
101,6	38,1	2,00
101,6	50,8	3,20

O dimensionamento da estrutura de alumínio consistiu em duas etapas distintas. A primeira foi realizar o dimensionamento dos perfis transversais (no sentido da largura da estrutura) a partir da Equação 11. A partir da definição das dimensões dos perfis transversais foram selecionadas as dimensões dos perfis longitudinais da estrutura do alumínio (dois perfis laterais da estrutura no sentido do comprimento) a partir do software ANSYS Mechanical® (2010).

Primeiramente, calculou-se o carregamento em cada perfil transversal (para isso, utilizou-se a carga referente à sua área de abrangência na estrutura), sendo que o carregamento mais crítico era de 51,5 kg<sub>f</sub> adicionado ao peso próprio do perfil. Para realizar a simulação da flecha máxima no perfil transversal, que são biapoiadas, foram aplicadas as dimensões dos perfis comerciais na Equação 11 (SHIGLEY et al., 2005). Após a simulação com os perfis, foi selecionado uma configuração para a construção da estrutura, que também foi utilizada na simulação de esforços das barras laterais (longitudinais).

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{wl^4}{384EI}$$

**Equação 11**

Em que:

Y<sub>máx</sub> – deformação máxima da barra biapoiada (m);

w – Peso distribuído da carga na barra (N);

- l – Comprimento da barra (m);
- E – Módulo de elasticidade ( $\text{N m}^{-1}$ );
- I – Momento de inércia do perfil ( $\text{m}^4$ );

A partir da carga crítica já calculada (carga que a barra longitudinal deve suportar) e com os perfis transversais determinados foi realizada a simulação das deformações da estrutura pelo software ANSYS Mechanical<sup>®</sup> (2010). No programa foram inseridas as características do alumínio com módulo de elasticidade (E) de 71,7 Giga pascal (GPa), e peso específico de  $2770 \text{ kg}_f \text{ m}^{-3}$  e Coeficiente de Poisson de 0,3. Dessa forma, foi simulada a deformação da estrutura (simulações das flechas nos perfis no sentido vertical) para diferentes dimensões comerciais dos perfis retangulares de alumínio, e selecionado o perfil de alumínio que apresentou deformação inferior a 6 mm. Esse critério foi adotado para que a variação do nível de água no interior da mesa em função da deformação da estrutura não ultrapassasse esse valor, pois variações excessivas da altura da lâmina de SN no interior da mesa podem afetar a umidade do meio de cultivo da cultura, e, conseqüentemente, causando desuniformidade na produção (BARRETO et al., 2012).

Para fins de cálculo, considerou-se que os perfis transversais descarregam a carga em perfis laterais (longitudinal), sendo esse hiperestático com três apoios, assim para o cálculo das flechas dos perfis laterais, foi utilizado o software ANSYS<sup>®</sup>, onde foram realizadas simulações para determinar os valores de deformações. Importante salientar que foi utilizada a simplificação de considerar a carga uniforme no cálculo da deformação. No entanto, por se tratar de água como carga, ela se redistribui conforme a deformação na mesa, não sendo assim uma carga uniforme, ou seja, é um processo dinâmico e não estático, podendo na estrutura real ter outro comportamento de deformações do que o simulado com carga uniforme e estática.

### **5.2.2.3. Sistema de adução e drenagem**

A operação da mesa de subirrigação é definida pelo tipo de funcionamento hidráulico adotado, que deve garantir a adução e drenagem da água ou SN de maneira eficiente, e também que possibilite o manejo hídrico para diferentes sistemas de cultivo, ou seja,

favorecendo a aplicação de diferentes alturas de lâmina de SN e de tempo de permanência no interior da mesa.

O sistema operacional hidráulico da mesa deve permitir sua automação com reuso e recirculação da SN para obter elevada eficiência (BARRETO, 2010), uma vez que o descarte da solução contribui para fontes de poluição, contaminando o solo e o lençol freático (MELLANO, 2011). Outra característica avaliada nos sistemas existentes é que para aumentar a uniformidade da lâmina de adução e drenagem e evitar acúmulos de SN na mesa, ela deve se caracterizar por direcionar tanto a solução que é aduzida como drenada da mesa de forma uniforme sobre a sua superfície.

A localização do sistema de drenagem é outro fator dentro desse critério que afeta a operação do sistema. O dreno deve ser localizado de tal forma que uma calha ou tubulação possa derivar a SN recolhida para os reservatórios, para ser reutilizados nas próximas irrigações. Da mesma forma, a área do dreno deve ser dimensionada para que ambas as operações (drenagem e adução) sejam realizadas de forma precisa e rápida e, se possível pelo mesmo local, evitando a instalação de duas tubulações, uma para cada operação.

Outra característica importante do sistema operacional hidráulico da mesa é que ele deve permitir um controle eficiente da variação da altura e do tempo em que a lâmina de SN fica em contato com a base dos recipientes de produção. Dessa forma, para viabilizar o manejo hídrico nutricional adequado para as plantas, disponibilizando água e nutrientes às plantas, deve-se conhecer as características do meio, que possuem diferentes comportamentos para a ascensão capilar como substratos de pinus e coco (BARRETO et al., 2012).

A partir das informações obtidas nos levantamentos, verificou-se a existência de dois tipos de sistema operacionais hidráulicos em mesas de subirrigação: um que opera com os drenos abertos durante todo o tempo de operação e outro que os drenos são abertos somente no momento da retirada da solução do interior da mesa. No primeiro, a drenagem da mesa é realizada concomitantemente com a adução, sendo que pelo maior valor da vazão de adução, a lâmina de água é criada no interior da mesa, até o momento em que se atinge o valor máximo requerido, quando cessa a adução e ocorre somente a drenagem. No segundo tipo de sistema, as duas operações ocorrem separadas. Primeiro é feita a adução por um determinado tempo, até atingir a altura de lâmina desejada e, a partir desse momento, cessa a adução e uma válvula controla a abertura da drenagem.

Buscando analisar essas duas alternativas, realizou-se uma simulação do tempo de adução e drenagem para ambos os sistemas, a partir dos equacionamentos teóricos do funcionamento dos dois sistemas operacionais, que são mostrados a seguir.

#### Equacionamento do sistema de drenos abertos para a adução de SN

Para o sistema de dreno sempre aberto, o tempo requerido para a SN atingir a altura da lâmina requerida é igual ao volume de água ou SN necessário na mesa dividido pela vazão de adução menos a vazão de drenagem, que é a vazão real de enchimento da mesa, conforme a Equação 12.

$$T_{a_{da}} = \frac{(A_r \times h) \times 1000}{(Q_a - Q_d)} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

$T_{a_{da}}$  – Tempo de adução da SN da mesa para o sistema de dreno aberto (min);

$h$  – Lâmina requerida de SN na mesa (m);

$Q_a$  – Vazão de adução da mesa ( $L \text{ min}^{-1}$ );

$Q_d$  – Vazão de drenagem da mesa ( $L \text{ min}^{-1}$ ).

No entanto nesse sistema, a altura da lâmina de água dentro da mesa varia com o tempo e, assim, o valor da vazão de drenagem vai variar a cada instante, podendo este ser expresso pela Equação 13.

$$Q_d = C_d \times S \times \sqrt{\left(2 \times g \times \frac{dh}{dt}\right)} \times 60000 \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

$C_d$  – Coeficiente de descarga do dreno (adotado 0,61);

$S$  – Área da saída de dreno ( $m^2$ );

$g$  – Aceleração gravitacional ( $9,81 \text{ m s}^{-1}$ );

$dh/dt$  – Variação da altura da lâmina de água na mesa com o tempo ( $m \text{ s}^{-1}$ );

O valor do tempo total de drenagem do sistema com dreno aberto durante a adução pode ser descrito pela Equação 14.

$$T_{da} = t_{da} + \frac{(Ar+h) \times 1000}{Q_{dreno}} \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

$T_{da}$  – Tempo total de drenagem da SN da mesa para o sistema de dreno aberto (min);

O valor do volume total de SN requerido nesse sistema para se atingir a lâmina requerida na mesa poder ser descrito pela Equação 15.

$$V_{da} = (Q_a - Q_d) \times T_{da} \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

$V_{da}$  – Volume de SN utilizado para atingir a altura requerida no sistema de dreno aberto durante a adução (L).

#### Equacionamento do sistema de drenos fechados durante a adução de SN

Para o sistema que opera com o dreno fechado durante a adução da mesa, e que é aberto apenas depois que cessa a adução, o valor do tempo que a SN leva para atingir a altura da lâmina requerida pode ser estimado pelo volume requerido de solução, calculado pela multiplicação da área da mesa pela altura da lâmina requerida, dividido pela vazão de adução, conforme a Equação 16.

$$T_{df} = \frac{(Ar \times h) \times 1000}{(Q_a)} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

$T_{df}$  – Tempo de adução da SN da mesa para o sistema de dreno fechado (min);

O valor do tempo de drenagem para esse sistema pode ser descrito na Equação 17.

$$Td_{df} = \frac{(Ar \times h) \times 1000}{(Q_d)} \quad \text{Equação 17}$$

Em que:

$Td_{df}$  – Tempo de drenagem da SN da mesa para o sistema de dreno fechado (min);

O volume de SN utilizado para atingir a lâmina requerida no sistema de dreno fechado durante a adução é igual a área da mesa multiplicada pela altura desejada conforme a equação 18.

$$V_{df} = Ar \times h \times 1000 \quad \text{Equação 18}$$

Em que:

$V_{df}$  – Volume de SN utilizado para atingir a lâmina requerida no sistema de dreno fechado (L).

A partir das equações apresentadas foram calculados o tempo de adução, tempo de drenagem e volume utilizado para os sistemas com dreno sempre aberto e com dreno fechado durante a adução para as mesmas condições operacionais. Com os valores dessas variáveis (tempo de adução, tempo de drenagem e volume utilizado) realizou-se uma análise comparativa entre os dois sistemas para a tomada de decisão sobre o sistema operacional a ser adotado na construção do protótipo da mesa. As alturas de lâminas e vazões simuladas para parâmetros de comparação foram de 0,01 0,03 e 0,05 m, e vazões de 10, 20 e 30 L min<sup>-1</sup>, respectivamente, a área do reservatório (mesa de subirrigação) foi de 8,40 m<sup>2</sup> para os valores das dimensões de projeto de 5,32 m e 1,58 m respectivamente para comprimento e largura da mesa, o diâmetro do orifício de drenagem foi de 3/4” (19,05 mm).

#### 5.2.2.4. Automação do sistema

A concepção da automação da mesa de subirrigação partiu do princípio que o sistema deve controlar o acionamento da motobomba durante um intervalo de tempo programável ou por um sensor de umidade, e que o seu desligamento ocorrerá pela ação de um sensor de nível de água, permitindo definir o manejo da irrigação por meio da altura da lâmina de SN

requerida para diferentes culturas. Assim, a estratégia de controle da altura da lâmina de SN no interior das mesas seria igual ao ajuste dos controladores de nível.

A automação com controle do manejo e reuso da SN visa reduzir os descartes de SN que pode contaminar o solo e o lençol freático (MANGIAFICO et al., 2010). No entanto, a recirculação constante da SN pode alterar a concentração de fertilizantes, requerendo a reposição periódica de fertilizantes, baseado na concentração requerida de fertilizantes, pH e CE para voltar as condições iniciais, ou trocar a SN para não prejudicar a produção, que deve ser descartada corretamente para não causar impactos para o meio ambiente.

Visando atingir o desenvolvimento de uma mesa de subirrigação que tivesse a sua operação totalmente automatizada, a partir da aplicação dos critérios de projeto, buscou-se uma parceria com a empresa Tandra Sistemas de Controle Ltda., (TANDRA, 2013) para viabilizar a automação do sistema de subirrigação, a partir do controle automático do acionamento e desligamento da motobomba.

### **5.2.3. Construção do protótipo da mesa de subirrigação**

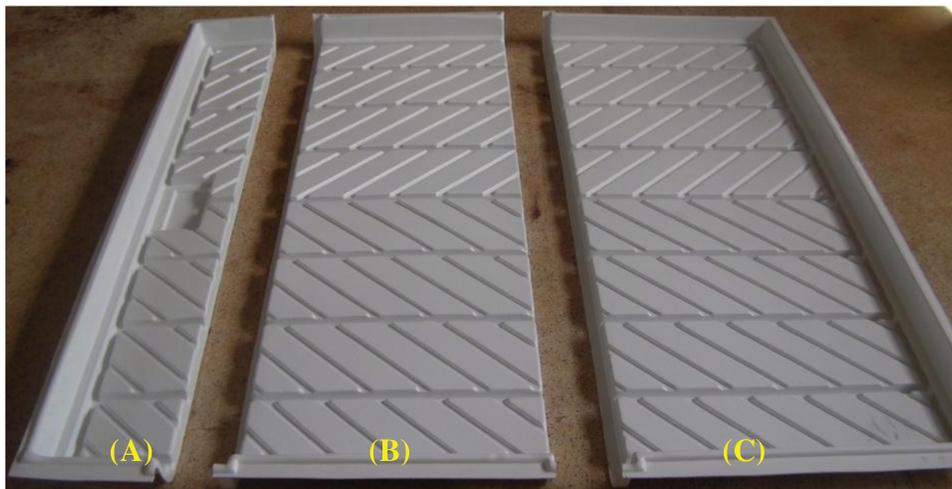
#### **5.2.3.1. Montagem da mesa de subirrigação**

A construção da mesa de subirrigação foi realizada em parceria com a empresa Modelagem Ideal (2012), que trabalha com fabricação de moldes e moldagem de peças com o sistema *vacuum forming*. A partir do projeto, foram construídos três moldes das partes constituintes da mesa: a extremidade da mesa com o dreno, a parte intermediária e a extremidade sem dreno. Os moldes foram confeccionados com madeira, fibra de vidro e revestido com pó de alumínio (Figura 9).

Após a construção dos moldes, foram moldadas as peças com placas de poliestireno de alto impacto (PSAI) para a construção de uma mesa protótipo, que era constituída por 11 partes, sendo uma extremidade do dreno (Figura 10 A), nove partes intermediárias (Figura 10 B) e uma extremidade sem dreno (Figura 10 C).



**Figura 9. Ilustração do molde para fabricação da mesa de subirrigação.**



**Figura 10. Ilustração das partes constituintes da mesa de subirrigação: extremidade com dreno (A), parte do meio (B) e extremidade sem dreno (C).**

Para a montagem da mesa protótipo, as partes moldadas foram unidas por um encaixe que utilizava uma vedação composta de uma guarnição de borracha e parafusos nos encaixes (Figura 11 A). Depois de montada, a mesa foi preenchida completamente com água para verificação de vazamentos (Figura 11 B).



(A)



(B)

**Figura 11. Ilustração dos aspectos da montagem das partes moldadas (A) e a mesa de subirrigação montada (B).**

### 5.2.3.2. Construção do suporte da mesa de subirrigação

Depois de dimensionado a estrutura do suporte da mesa, adquiriu-se os perfis de alumínio e realizou a sua construção no Laboratório de Protótipos da FEAGRI, que foi, posteriormente instalada na estufa experimental da FEAGRI para a montagem final da mesa (Figura 12 A). Os apoios da mesa foram construídos de forma a permitir o ajuste da altura com uma rosca, possibilitando precisão no nivelamento da mesa (Figura 12 B).



(A)



(B)

**Figura 12. Vista da estrutura de suporte da mesa de subirrigação construída com perfis de alumínio (A) e apoio do suporte com ajuste de altura tipo rosca (B).**

#### **5.2.4. Análise de custo do protótipo da mesa**

Foi realizada a análise de custo para a fabricação do protótipo da mesa de subirrigação para verificar a viabilidade e o seu potencial comercial, para inserção no mercado nacional. Nessa análise foram discriminados os materiais e as quantidades utilizados na confecção e montagem da mesa, e os seus respectivos custos. Também foram relacionados o custo de fabricação dos moldes das partes da mesa e custo de mão de obra e o tempo de trabalho para montagem da mesa, da estrutura e da instalação na estufa experimental.

### **5.3. Avaliação da mesa de subirrigação**

Nessa etapa foi realizada a avaliação hidráulica do protótipo da mesa de subirrigação, com a determinação dos parâmetros de operação, como os tempos de adução e drenagem, para diferentes vazões e alturas de lâmina de água. A avaliação foi realizada para caracterizar hidráulicamente o protótipo e contribuir para a determinação de parâmetros de operação e de manejo para a mesa de irrigação nessas condições e, também, para observar os detalhes que possam interferir e ou alterar a maneira de manejo, como a determinação do tempo de drenagem a partir das vazões e dos orifícios dos drenos adotados.

#### **5.3.1. Parâmetros de operação**

A avaliação da operação do protótipo da mesa de subirrigação consistiu em medir o tempo de adução e o volume aduzido para diferentes valores de lâmina a ser armazenados no interior da mesa e para diferentes vazões de adução. Esses parâmetros foram medidos para os valores de vazões pré-determinados de  $1,67 \times 10^{-4}$ ,  $3,33 \times 10^{-4}$  e  $5,00 \times 10^{-4} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (correspondente a 10, 20 e 30 litros por minuto, respectivamente), obtidos pelo controle de um registro de gaveta, e para as lâminas de 0,01, 0,03 e 0,05 m, conforme os valores da Tabela 2. Para cada combinação dessas variáveis de ensaio foram realizados três repetições. O volume foi medido pelo uso de hidrômetros (marca Tecnobrás), e o tempo de adução monitorado por cronômetros (marca Cassio).

Em cada ensaio, foi também medido o tempo e o volume drenado em intervalos de 1 minuto para cada combinação de altura e vazão de adução. O volume drenado foi quantificado pela leitura de uma escala milimétrica instalada na parede do reservatório que foi calibrada para indicar o volume preenchido da caixa de água. Com o valor do volume drenado da mesa e o respectivo valor de tempo, determinou-se a vazão de drenagem para cada intervalo de tempo. Foram realizadas nove repetições para o procedimento de drenagem de cada altura em estudo (3 vazões com 3 repetições para todas as alturas de lâmina).

**Tabela 2. Valores de vazão e altura da água no interior da mesa de subirrigação utilizados na determinação do volume, vazão de drenagem e tempos de adução e drenagem.**

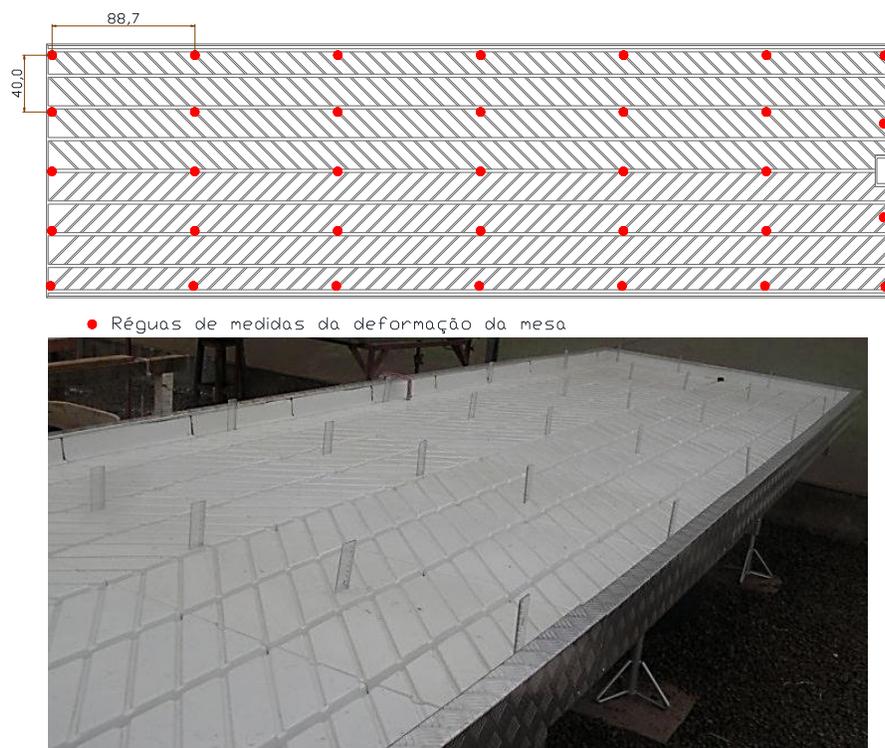
$Q_{\text{adução}} (10^{-4} \text{ m}^3\text{s}^{-1})$	$h_{\text{lâmina}} (\text{m})$
1,67	0,01
	0,03
	0,05
3,33	0,01
	0,03
	0,05
5,00	0,01
	0,03
	0,05

### 5.3.2. Deformação da estrutura e uniformidade da lâmina de água no interior da mesa

Assumindo que a deformação na estrutura da mesa devido ao carregamento com água e peso próprio do sistema gerará deformações no interior da mesa, adotou-se que a determinação da variação da altura da lâmina de água no interior da mesa forneceria informações sobre a deformação causada em todo o conjunto (somatório das deformações da parte de PSAI e da estrutura de suporte).

Para cada ensaio (Tabela 2) foram medidas as alturas da lâmina de água no interior da mesa de subirrigação, que deve refletir as deformações causadas em todo o sistema composto pela estrutura de alumínio e os módulos de PSAI. Para isso foram dispostas régua graduadas no interior da mesa de subirrigação espaçadas regularmente de 40,0 cm por 88,7 cm (Figura 13), totalizando 34 medidas da altura da água, que permitiram a leitura da altura da água em

cada ponto, e a quantificação indireta das deformações de todo o conjunto e, conseqüentemente, a uniformidade da altura da lâmina de água no interior da mesa.



**Figura 13. Vista da localização das régulas graduadas no interior da mesa de subirrigação para medir a altura da lâmina de água.**

Após a adução de cada altura da lâmina de água na mesa de subirrigação para as três vazões estudadas, foram realizadas leituras nas régulas totalizando nove repetições por altura de lâmina de água (3 vazões com 3 repetições para cada altura de lâmina). Com os dados coletados foram estimadas as médias de cada altura e construídos gráficos utilizando software Surfer<sup>®</sup> (2009), para visualização da variação da lâmina e inferência das deformações da mesa e da estrutura.

#### **5.4. Simulações operacionais de manejo**

Um parâmetro que deve ser levado em consideração para adotar manejo de diferentes culturas, é o tempo de permanência da SN no interior da mesa, que definirá o tempo de contato com o substrato e raízes das plantas. Esse tempo de permanência, que é a soma do tempo de adução e drenagem, é função do valor da vazão de adução e de drenagem.

O tempo de drenagem da mesa de subirrigação pode ser calculado por meio da equação 19 (DOCSTOC, 2012).

$$t_{drenagem} = \frac{2 \times Ar}{cd \times S \times \sqrt{2 \times g}} \times (\sqrt{h + h_{dreno}} - \sqrt{h_{dreno}}) \quad \text{Equação 19}$$

Em que:

$t_{drenagem}$  = Tempo de drenagem da mesa de subirrigação (s);

S = Área do dreno (m<sup>2</sup>);

$h_{dreno}$  = Profundidade do dreno a partir da lâmina zero (m);

A partir da determinação do tempo de drenagem (Equação 19) somado ao tempo de adução do sistema para a altura de lâmina requerida, pode-se obter o tempo de permanência da SN na mesa de subirrigação. Dessa forma, foi realizado um cálculo do tempo de permanência da SN no interior da mesa de subirrigação em função da altura de lâmina de SN no interior da mesa para as vazões em estudo, com os diâmetros comerciais de drenos de ½" (12,7 mm), ¾" (19,0 mm), 1" (25,4 mm) e 1 ½" (38,1 mm). Dessa maneira foi possível estabelecer o diâmetro do orifício de dreno para se adequar ao manejo requerido de produção.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1. Caracterização e avaliação de um sistema de subirrigação**

#### **6.1.1. Caracterização do sistema de subirrigação**

A partir das pesquisas e levantamentos realizados nos meios de comunicação, principalmente pela internet, encontraram-se diversas empresas que fabricam e comercializam sistemas convencionais de irrigação. No entanto, verificou-se a existência de somente um fabricante de mesas de subirrigação, a *Stal e Plast* localizado na Dinamarca. Pelo seu website (STAAL PLAST, 2012) foi possível verificar que as mesas de subirrigação são fabricadas em linhas de produção por meio do processo automatizado denominado termoformagem ou moldagem a vácuo (vacuum forming) (Tabela 13 no Anexo I). A atuação efetiva dessa empresa dinamarquesa no mercado mundial ficou evidente quando se identificou que as empresas dos Estados Unidos da América que trabalham com mesas de subirrigação são suas revendedoras, conforme informado nos seus websites, fornecendo somente a montagem (Tabela 13 no Anexo I).

No Brasil, foram identificadas as empresas Flórida Estufas Agrícolas (2012) e TropClima -Equipamentos para Estufas Agrícolas (2012), na cidade de Holambra, SP, que apesar de não fabricarem mesas de subirrigação em escala, atendem pedidos específicos de produtores.

A partir das informações obtidas das empresas verificou-se que o comprimento e largura das mesas e bancadas de subirrigação são variáveis, para permitir a sua instalação em diferentes situações de produção em ambientes protegidos, permitindo um melhor aproveitamento da área útil de produção. Verificou-se também que a altura da borda das mesas de subirrigação varia entre 4,5 cm e 12 cm.

As visitas realizadas em propriedades que utilizavam os sistemas de subirrigação permitiram identificar detalhes dos projetos de construção e instalação desses equipamentos, principalmente na empresa James Greenhouse/EUA (2012) onde a instalação do sistema de subirrigação foi realizada por empresas especializadas em sistemas de subirrigação. Diferentemente, os sistemas fabricados no Brasil, por serem dimensionados para atender

necessidades específicas do produtor, apresentavam problemas nas estratégias de construção como: seleção incorreta do material, dimensões fora de padrões ergonômicos, cantos e quinas cortantes, ausência de canais de drenos no interior da mesa, orifício de drenos entupidos, devido ao mau dimensionamento do dreno, manutenção e operação, condicionando baixa eficiência de drenagem, mesas pesadas e superdimensionadas etc.

Uma das vantagens observadas em alguns sistemas visitados foi o fato de sua instalação permitir a movimentação das mesas, permitindo ao agricultor ocupar o espaço da estufa de forma mais eficiente. Além disso, a movimentação do sistema possibilita a organização de uma linha de produção, na qual a cultura, no estágio inicial, entra no sistema de produção, se movimentando durante o seu ciclo de desenvolvimento, e sendo retirada do sistema no momento da colheita ou comercialização. A mobilidade da mesa também facilita o deslocamento para outros setores do processo de produção, onde os trabalhadores ficam em um ambiente adequado de trabalho, com postura corporal de acordo com as exigências ergonômicas antropométricas, e ambientalmente confortáveis com relação à temperatura e ruídos na hora da colheita das plantas.

Outra opção de fabricação correta foi a utilização de estruturas de suporte com perfis de alumínio, pois são leves, e com resistência estrutural e à corrosão, pois as soluções nutritivas utilizadas na irrigação pode ter um caráter corrosivo ao entrar em contato com determinados metais.

Outra característica positiva visualizada no projeto das mesas de subirrigação foi à existência de ranhuras ou canais em seu fundo, que orientam e auxiliam a drenagem da SN em seu interior. A inexistência desses canais permite acúmulo da SN nas irregularidades da superfície gerando corrosão localizada, como foi observado nas mesas de alumínio da empresa International Paper. Além disso o acúmulo de SN possibilita o acréscimo de impurezas e patógenos, e o desenvolvimento de plantas daninhas.

Pode verificar nas visitas às propriedades o uso de mesas e bancadas com dimensões variáveis, não existindo um padrão de fabricação. Esse fato é decorrente da diversidade de dimensões de módulos de ambientes protegidos comercializados, com os fabricantes adotando dimensões sem padrão na fabricação de estufas, onde cada empresa tem suas especificações. Assim, as mesas e bancadas são construídas de acordo com as dimensões dos módulos de ambiente protegido, tornando o projeto das dimensões específico para cada sistema.

Outra característica observada nas visitas foi o fato que os sistemas eram automatizados com recirculação da SN, buscando minimizar problemas de escassez de mão de obra e ambiental, para aumentar a precisão do controle do manejo. A maioria dos sistemas visitados apresentava controle individual de adução e de drenagem em cada mesa, utilizando válvulas solenoides. Esse fato revela que uma proposta de um sistema em escala comercial deve obrigatoriamente atender a possibilidade de automação da sua operação.

## **6.1.2. Avaliação do sistema de subirrigação**

### **6.1.2.1. Parâmetros medidos nas mesas de subirrigação**

Na Tabela 3 são mostrados os valores de vazão e volume de adução e drenagem de cada mesa avaliada, a quantidade de solução armazenada nos tubetes com substratos, a quantidade de solução evapotranspirada pela cultura e a quantidade de solução perdida, durante um evento de irrigação.

Pela Tabela 3 é possível observar a ocorrência de variação nos valores de vazão e volume das mesas dentro e entre os módulos. O volume de adução variou de 169,6 a 238,0 L, significando uma diferença de 40% em relação ao menor valor. Essa diferença pode afetar o desenvolvimento das plantas ao longo do tempo entre as mesas, pois a diferença de volume interfere na altura da lâmina e no tempo de permanência de SN no interior da mesa, conseqüentemente, afetando a quantidade de SN absorvida pelo substrato no tubete conforme mostra um estudo feito por Ferreira Filho et al. (2012) que verificou diferenças na umidade do substrato submetido a diferentes alturas e intervalos de tempo.

A diferença no volume aduzido entre as mesas, que interfere na disponibilidade de SN e no tempo de contato da SN com o substrato, pode ter ocorrido devido à perda de carga na tubulação de adução com múltiplas saídas entre a primeira e a última mesa ou pela variação no fornecimento da energia elétrica que alimenta a motobomba, alterando a sua curva de funcionamento, e também pela presença de vazamentos nas tubulações que alimentam as mesas.

**Tabela 3. Valores da vazão e volume de adução e drenagem, do volume de SN armazenado pelo substrato e volume estimado da evapotranspiração das plantas e perdido nas mesas de subirrigação por evento de irrigação.**

Módulo	Bloco	Mesa	Vazão (L min <sup>-1</sup> )		Volume (L)		Volume Estimado. (L)		
			Q <sub>a</sub> <sub>m</sub>	Q <sub>d</sub> <sub>m</sub>	V <sub>a</sub> <sub>m</sub>	V <sub>d</sub> <sub>m</sub>	V <sub>s</sub> <sub>m</sub>	ET	V <sub>p</sub> <sub>m</sub>
1	1	1	21,5	4,2	238,0	232,1	0,48	0,78	4,64
		4	21,3	4,2	235,8	231,6	0,41	0,78	2,96
		7	21,3	4,2	235,2	230,7	0,69	0,78	3,01
		10	23,1	4,5	255,7	247,1	0,87	0,78	6,94
2	1	1	17,1	4,5	219,5	216,6	0,73	0,78	1,39
		4	13,2	3,5	169,6	167,5	0,89	0,78	0,43
		7	17,3	4,5	221,6	214,7	0,61	0,78	5,51
		10	17,4	4,5	222,8	216,5	0,52	0,78	5,00
5	3	1	17,5	3,6	192,6	186,0	1,56	0,78	4,26
		4	21,0	4,3	230,5	224,5	0,69	0,78	4,53
		7	21,6	4,4	237,1	229,4	0,30	0,78	6,62
		10	21,9	4,4	230,5	227,4	0,62	0,78	1,70
6	2	1	18,0	3,9	197,7	187,0	0,52	0,78	9,40
		4	17,6	3,9	193,5	189,4	0,77	0,78	2,55
		7	17,3	3,9	190,3	187,4	0,81	0,78	1,31
		10	17,5	3,9	192,6	189,4	0,83	0,78	1,64
<b>Média/mesa/irrigação</b>			<b>19,0</b>	<b>4,1</b>	<b>216,4</b>	<b>211,1</b>	<b>0,71</b>	<b>0,78</b>	<b>3,87</b>
<b>Desvio padrão</b>			<b>2,6</b>	<b>0,33</b>	<b>23,84</b>	<b>23,11</b>	<b>0,28</b>	<b>-</b>	<b>2,45</b>

Q<sub>a</sub><sub>m</sub> – Vazão de adução de SN na mesa (L min<sup>-1</sup>); Q<sub>d</sub><sub>m</sub> – Vazão de drenagem de SN na mesa (L min<sup>-1</sup>); V<sub>e</sub><sub>m</sub> – Volume de entrada de SN na mesa (L); V<sub>d</sub><sub>m</sub> – Volume de drenagem de SN na mesa (L); V<sub>s</sub><sub>m</sub> – Volume armazenado de SN pelo substrato (L); ET – Volume evapotranspirado de uma mesa em uma hora (L); V<sub>p</sub><sub>m</sub> – Volume perdido de SN na mesa em um evento de irrigação (L).

O armazenamento de SN no substrato por mesa apresentou valor médio de 0,71 L (Tabela 3). Devido ao crescimento radicular intenso, observou-se a existência de baixos volumes de substrato no interior dos tubetes, o que determinou a ocorrência de baixo valor de volume armazenado de SN nos tubetes. Esse valor pode ser considerado baixo, pois de acordo com Zanetti et al. (2003), o armazenamento de água em um substrato de fibra de coco pode variar de 28 a 72% do volume ocupado pelo substrato, sendo que 28% significariam 9,4 L de SN armazenado no substrato de uma mesa de subirrigação.

Assim, a baixa quantidade de substrato presente nos tubetes reduziu significativamente o armazenamento de SN nos tubetes, permitindo caracterizar a operação do sistema praticamente como hidropônico. Esse comportamento era mais evidente nas mudas mais antigas dentro do sistema de produção, nas quais o volume interno do tubete era quase que totalmente preenchido por raízes. Portanto, a variação encontrada entre os valores armazenados pode ser consequência das diferentes idades das mudas no sistema, provenientes da renovação parcial das mudas clonais em intervalos de 8 meses.

Observa-se ainda na Tabela 3 que há diferenças entre os volumes de perdas de SN entre as mesas. Ressalta-se que uma das mesas avaliadas apresentou perdas 9,40 L em um único evento de irrigação, enquanto outra apresentou uma perda menor que 0,43 L. Essas perdas eram causadas por orifícios originados pela corrosão das mesas pela SN e agravadas pelo empocamento da solução em mesas desniveladas e falta de canais de dreno na mesa. Além das perdas, outra forma de retirada de SN do sistema era por evapotranspiração das mudas de eucalipto estimada em  $0,78 \text{ L hora}^{-1}\text{mesa}^{-1}$ .

A Tabela 4 apresenta os valores médios do tempo de adução e drenagem da solução da mesa, tempo de contato da SN com o tubete, e altura máxima da lâmina de SN no tubete dos blocos avaliados.

**Tabela 4. Valores médios do tempo de adução, tempo de drenagem, tempo de contato da solução nutritiva com o tubete e altura máxima da lâmina no tubete das mesas avaliada em cada módulo.**

Módulo	Bloco	Ta <sub>m</sub> (min)	Td <sub>m</sub> (min)	TCT (min)	ALT (m)
1	1	11,05	51,00	29,00	0,037
2	1	12,83	46,50	25,00	0,038
5	3	11,00	46,50	27,00	0,035
6	2	11,00	43,50	27,00	0,034

Ta<sub>m</sub> – Tempo médio de adução de SN nas mesas do módulo (min); Td<sub>m</sub> – Tempo médio de drenagem de SN nas mesas do módulo (min); TCT – Tempo médio de contato da SN com o tubete nas mesas do módulo (min); ALT – Média da altura máxima da lâmina de SN nas mesas do módulo (m). Obs.: média de 4 repetições.

Pode-se verificar na Tabela 4 que os tempos de adução foram similares entre os blocos avaliados, exceto para o módulo 2, que foi quase 2 minutos superior, apresentando um tempo de 12,83 minutos, apesar do controle de tempo ser automático. O tempo de drenagem estava diretamente relacionado com a área dos drenos que era alterada por vazamentos e obstruções causadas por material orgânico, ocasionando variação do tempo de drenagem entre os blocos. Essa variação no tempo de adução e drenagem interferiu no tempo e na altura em que os tubetes ficaram em contato com a SN, afetando o volume de SN absorvido pelo substrato.

A altura da lâmina de SN no tubete foi em média de 0,036 cm, correspondendo a 33% da altura do tubete, sendo que o fornecimento de SN para a altura restante do tubete deveria ocorrer pelo principio da capilaridade (Tabela 4). No entanto, devido à baixa disponibilidade de substrato no tubete, a capilaridade praticamente não ocorria, limitando, assim, o

fornecimento de solução para a parte submersa em SN e para as raízes em contato com a mesma. A altura média utilizada no sistema de subirrigação de 0,036 cm pode ser considerada adequada, como mostra trabalhos realizados por Ferrarezi et al (2012) e Ferreira Filho et al (2012) que constataram que a altura de lâmina de SN equivalente 30% da altura do recipiente permite que a disponibilização da umidade ideal para o meio de cultivo nos substratos de fibra de coco, casca de pinus e turfa.

### 6.1.2.2. Eficiência das mesas de subirrigação

A Tabela 5 apresenta os valores de porcentagem de SN que retorna para os reservatórios para serem reutilizados nas próximas irrigações, do armazenamento da SN nos tubetes, da evapotranspiração das mudas, das perdas de solução nas mesas, da eficiência de armazenamento, das eficiências de aplicação e de irrigação com relação ao volume total aduzido de cada mesa avaliada durante um evento de irrigação.

**Tabela 5. Valores das percentagens médias do volume de retorno da SN aos reservatórios, evapotranspiração das mudas (ET), perdas nas mesas (PP), eficiência de armazenamento (Es), eficiência de aplicação (EA) e eficiência de irrigação (EI), com relação ao volume aduzido em cada mesa de subirrigação avaliada.**

Mód.	Bloco	Mesa	Retorno	ET	PP <sub>m</sub>	Es <sub>m</sub>	EA <sub>m</sub>	EI <sub>m</sub> *
			%	%	%	%	%	%
1	1	1	97,5	0,3	2,0	0,2	0,5	98,0
		4	98,2	0,3	1,3	0,2	0,5	98,7
		7	98,1	0,3	1,3	0,3	0,6	98,7
		10	96,6	0,3	2,7	0,3	0,6	97,3
2	1	1	98,7	0,4	0,6	0,3	0,7	99,4
		4	98,8	0,5	0,3	0,5	1,0	99,7
		7	96,9	0,4	2,5	0,3	0,6	97,5
		10	97,2	0,4	2,2	0,2	0,6	97,8
5	3	1	96,6	0,4	2,2	0,8	1,2	97,8
		4	97,4	0,3	2,0	0,3	0,6	98,0
		7	96,8	0,3	2,8	0,1	0,5	97,2
		10	98,7	0,3	0,7	0,3	0,6	99,3
6	2	1	94,6	0,4	4,8	0,3	0,7	95,2
		4	97,9	0,4	1,3	0,4	0,8	98,7
		7	98,5	0,4	0,7	0,4	0,8	99,3
		10	98,3	0,4	0,9	0,4	0,8	99,1
<b>Média</b>			<b>97,5</b>	<b>0,4</b>	<b>1,8</b>	<b>0,3</b>	<b>0,7</b>	<b>98,2</b>
<b>Desvio padrão</b>			<b>1,10</b>	<b>0,04</b>	<b>1,13</b>	<b>0,16</b>	<b>0,19</b>	<b>1,13</b>

\*Considerou-se que todo retorno seja utilizado.

ET – Evapotranspiração de uma mesa em uma hora (%); PP<sub>m</sub> – Perdas por percolação na mesa (%); Es<sub>m</sub> – Eficiência de armazenamento da mesa (%); EA<sub>m</sub> – Eficiência de aplicação de SN na mesa (%); EI<sub>m</sub> – Eficiência de irrigação de SN na mesa (%).

Os valores de eficiência de armazenamento e evapotranspiração não ultrapassaram 1% do total de solução disponibilizado. A porcentagem de perdas em cada mesa ficou entre 0,3 e 2,8%, sendo que essas variações são decorrentes dos vazamentos existentes no equipamento. O valor médio da eficiência de aplicação nas mesas foi de 0,7%, devido à baixa quantidade de SN armazenada pelo substrato e consumida pela planta em relação à quantidade de SN disponibilizada. A eficiência de irrigação foi em média 98,2%, concordando com o que preconizam Dumroese et al. (2006), para sistemas com recirculação da solução. De maneira contrária, Salvador (2010), avaliando a irrigação manual de produtores de mudas cítricas na fase sementeira, sem recirculação, verificou que a eficiência de irrigação foi de 33,6%.

Ainda na Tabela 5, pode-se verificar que a porcentagem de SN que retorna para os reservatórios é em média 97,5% do volume de adução. Valores elevados desse parâmetro vão requerer um maior volume de reservatórios, que aumenta o custo de implantação e também os gastos de energia, uma vez que, quanto maior o volume requerido, maior será o bombeamento e, conseqüentemente, maior o consumo de energia elétrica.

### **6.1.2.3. Eficiência do módulo de irrigação**

Para se determinar a eficiência de irrigação de cada módulo, foi estimado (com base em informações dos funcionários responsáveis pelo manejo da irrigação) que eram utilizados 36.500 L em cada módulo de irrigação, resultado da soma do volume inicial de 19.000 L nos reservatórios com os volumes de reposição de 2.500 L a cada 2 dias. Esse volume foi utilizado no abastecimento de 63 mesas de subirrigação, irrigadas seis vezes por dia durante 15 dias.

Utilizando os valores da Tabela 3, foi possível estimar o volume de SN consumida (armazenada, evapotranspirada e as perdas nas mesas) e as perdas (perdas de transporte e descarte do sistema) durante o período de irrigação para cada módulo.

A distribuição do armazenamento de SN pelo substrato, evapotranspiração da SN e perdas de SN no módulo de subirrigação durante o período de irrigação de 15 dias podem ser observadas na Figura 14.



**Figura 14. Porcentagens médias da SN no armazenada pelo substrato, evapotranspirada, perdida nas mesas e perdas pelo transporte e descarte no módulo de subirrigação durante o período de irrigação.**

Os valores dos volumes de SN armazenados nos tubetes corresponderam em média a 11% do valor total de SN disponibilizada para a produção das mudas nos 15 dias. Se esse valor for somado com o valor evapotranspirado de 12%, tem-se que a quantidade de SN consumida pelo sistema representou 23% do total. Por outro lado, o volume de reposição das perdas causadas por vazamentos das mesas significou um valor médio de 60%, sendo que os 17% restantes representam a quantidade de solução descartada ou perdida nas tubulações de adução e drenagem dos módulos (Figura 14)

Semelhantemente a outros sistemas de irrigação, as perdas de solução por vazamentos das mesas eram descartadas diretamente no solo, tendo assim o potencial de contaminá-lo e, conseqüentemente, contaminar também o lençol freático se não forem tratadas de forma adequada (MANGIAFICO et al., 2010).

A Tabela 6 mostra a eficiência de armazenamento, eficiência de irrigação e porcentagem de perdas nos módulos avaliados para o período de irrigação de 15 dias.

**Tabela 6. Valores da eficiência de armazenamento (Es), eficiência de Irrigação (EI) e porcentagem de perdas (PP) em cada módulo de subirrigação avaliado.**

Módulo	Es	EI	PP
	%	%	%
1	9,5	21,6	78,4
2	10,7	22,8	77,2
5	12,3	24,5	75,5
6	11,4	23,5	76,5
<b>Média</b>	<b>11,0</b>	<b>23,1</b>	<b>76,9</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>1,19</b>	<b>1,19</b>	<b>9,39</b>

Es – Eficiência de armazenamento no módulo de subirrigação (%); EI – Eficiência de irrigação no módulo de subirrigação (%); PP – Porcentagem de perdas no módulo de subirrigação (%).

Pela Tabela 6 é possível verificar que a eficiência de armazenamento apresentou um valor médio de 11%, sendo que porcentagem de perdas, soma de todas as perdas ocorridas no sistema, atingiu o valor de 76,9%, determinando um baixo valor de eficiência de irrigação nos módulos (apenas 23,1%). Esses resultados estão de acordo com Grewal et al. (2011), que constataram que 62% da água utilizada na subirrigação da cultura do pepino foram descartadas com a drenagem. Segundo Pinto et al. (2008), a redução do descarte de água com fertilizantes será benéfica para a produção de mudas, reduzindo o impacto da contaminação ambiental, aumentando a eficiência do uso da água e melhorando a qualidade das plantas com a subirrigação.

### **6.1.3. Consideração sobre critérios de projeto**

A partir das visitas técnicas, levantamento de informações de empresas e a avaliação do sistema de subirrigação, foram possíveis destacar alguns pontos considerados básicos para a elaboração dos critérios que vão nortear o projeto da mesa de subirrigação. Dentre eles podem-se citar:

- As dimensões da mesa de subirrigação devem ser flexíveis para atender diferentes formas e dimensões de ambientes protegidos;
- As mesas de subirrigação devem ser, preferencialmente, móveis para obter maior aproveitamento do espaço de produção dos ambientes protegidos, e permitir uma linha de produção no desenvolvimento da cultura.
- O material de construção da mesa de subirrigação deve ser resistente à corrosão devido ao contato com a SN;

- O material de construção da mesa de subirrigação deve apresentar características de resistência a esforços mecânicos, ser leve, devido à movimentação das mesas no interior dos ambientes protegidos;
- As mesas de subirrigação devem ser automatizadas com recirculação da SN, devido a escassez de mão-de-obra e redução do descarte de SN, e também para aumentar a eficiência de produção e evitar o desperdício e a contaminação de solos e águas subterrâneas;
- O fundo das mesas de subirrigação devem apresentar ranhuras ou canais de dreno para evitar acúmulo de SN, para reduzir o acúmulo de sujeira e evitar ambientes favoráveis ao desenvolvimento de patógenos e plantas daninhas. Os canais também auxiliam em uma adução de forma mais uniforme na mesa, e uma drenagem mais rápida.
- Automação deve permitir o controle da altura da lâmina de SN e tempo de permanência no interior da mesa, para possibilitar realizar diferentes manejos para diferentes culturas;
- A altura dos suportes deve ser ajustável, para permitir o nivelamento da mesa.

## **6.2. Projeto e construção do equipamento de subirrigação**

### **6.2.1. Projeto da mesa de subirrigação**

A mesa de subirrigação foi projetada e dimensionada seguindo os critérios adotados, sendo a tomada de decisões para a construção das partes constituintes da mesa baseada na aplicação dos parâmetros definidos nas visitas técnicas, na avaliação do sistema de subirrigação, no levantamento de informações de outros sistemas comerciais e nos procedimentos de cálculo.

#### **6.2.1.1. Dimensionamento da mesa de subirrigação**

Para permitir a construção de diferentes configurações de mesa e maximizar a sua aplicação na produção de ambientes protegidos optou-se por um projeto com comprimento

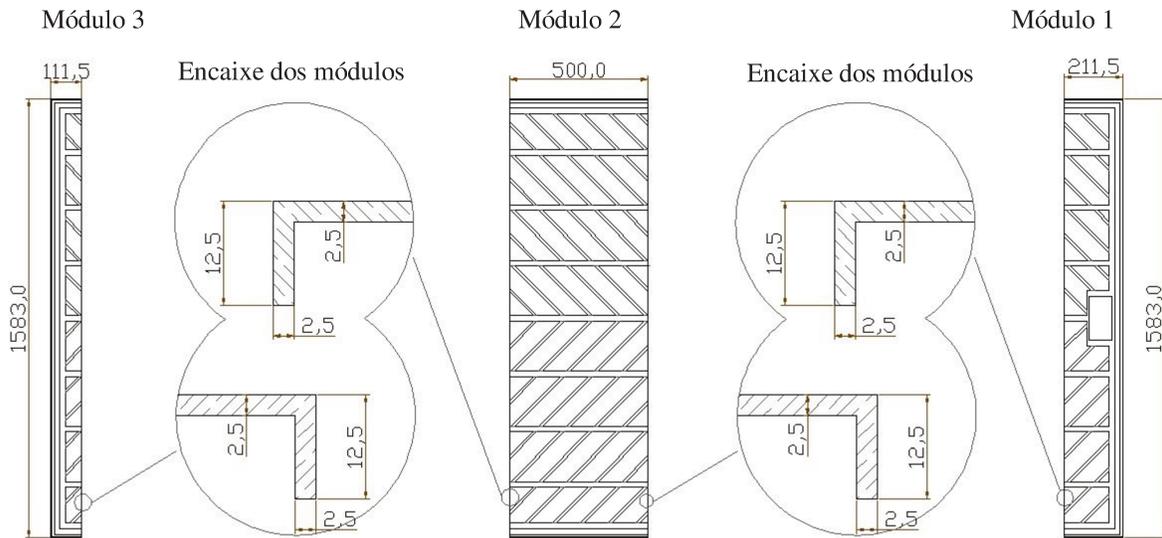
variável, sendo a largura definida a partir dos parâmetros antropométricos médios de trabalhadores brasileiros.

A dimensão da largura da mesa foi definida pelo valor do alcance máximo do braço de um trabalhador e considerando a possibilidade de haver trabalhos em ambos os lados da mesa, resultando na largura de 1,60 m. A mesa foi projetada com largura de 1,58 m deixando 0,01 m em cada borda para inserção de uma proteção de alumínio, e com altura de instalação de 0,80 m para atender os padrões de medidas antropométricas ergonômicas.

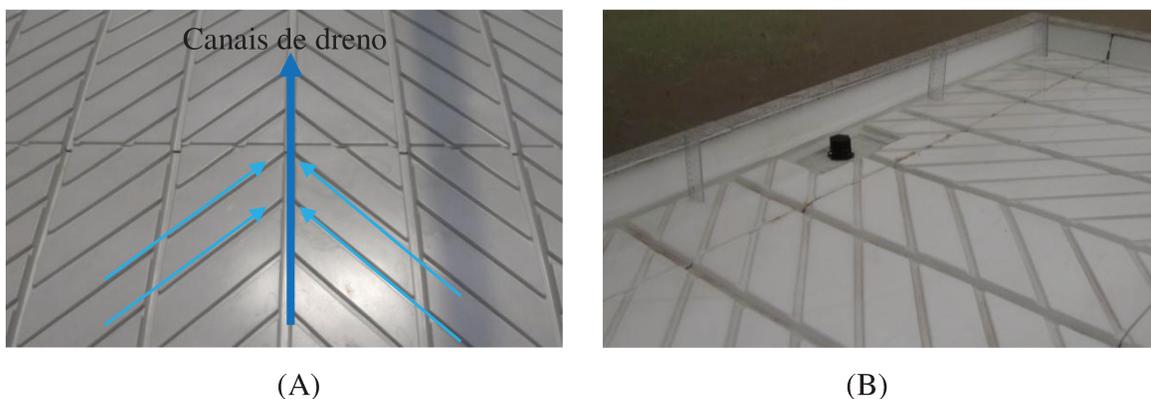
Com relação ao material selecionado, o PSAI foi escolhido pelas suas características e propriedades mecânicas e químicas, por ser um material resistente a esforços mecânicos e também por ser resistente a deterioração ao ser expostos a raios do sol e em contato com produtos químicos, disponibilidade no mercado nacional e facilidade para ser moldado. A partir do material e do processo de fabricação escolhido (termomoldagem) e visando permitir a flexibilização nas dimensões de comprimento, optou-se pela produção das mesas de subirrigação em módulos construtivos que permitissem a montagem com dimensões múltiplas desses módulos, e adequadas às diferentes dimensões dos módulos de ambientes protegidos.

Dessa forma, a mesa foi dividida em três módulos construtivos: cabeceiras inicial (módulo 1 da Figura 15) e final (módulo 3 da Figura 15) e módulo intermediário (módulo 2 da Figura 15), com comprimentos de 211,5, 111,5 e 500,0 mm respectivamente. O valor de comprimento do módulo intermediário foi restrito a 500,0 mm para possibilitar maiores combinações de comprimento na montagem e que a mesa seja montada em diferentes comprimentos, adicionando-se módulos intermediários.

Para auxiliar na distribuição uniforme da lâmina de adução e direcionar a drenagem do volume armazenado na mesa, evitando o acúmulo de SN no seu interior após o término de irrigação, projetou-se a superfície da mesa com ranhuras ou canais na direção do comprimento, conduzindo a SN para o orifício de adução e de drenagem da SN. Foram também adicionados canais menores com ângulo de 45°, direcionando a SN para os canais maiores, determinando assim uma movimentação mais rápida da água pelos caminhos preferenciais (Figura 16 A). O dreno foi localizado em uma das extremidades da mesa para facilitar a instalação e manutenção das tubulações (Figura 16 B).



**Figura 15. Vista superior e detalhes dos módulos construtivos das mesas de subirrigação.**

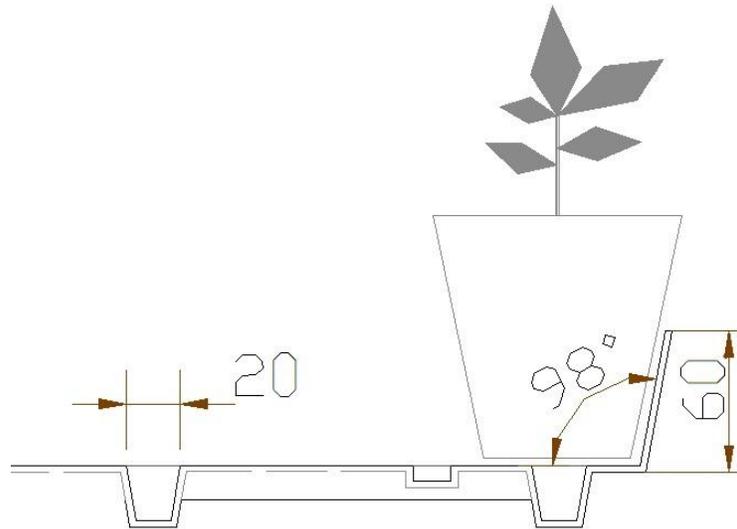


**Figura 16. Vista dos detalhes dos canais preferenciais de adução e drenagem da água (A), e da localização do dreno na extremidade da mesa de subirrigação (B).**

Os canais de drenagem da mesa foram dimensionados com 20 mm de largura e 20 mm de profundidade, considerando a dimensão do raio da base do menor recipiente encontrado no mercado, reduzindo o risco de tombamento dos recipientes dentro da mesa (Figura 17).

Visando dar uma maior aplicabilidade e aproveitamento das dimensões da mesa, projetou-se uma inclinação na sua borda para permitir a ocupação de uma maior quantidade de recipientes, levando em consideração o ângulo médio de inclinação dos diversos vasos e tubetes existentes no mercado. As Tabela 16 e Tabela 17, no Anexo I, apresenta as inclinações características de diferentes vasos, que variam  $91,5^\circ$  a  $104,7^\circ$ , com média de  $98,8^\circ$ . Dessa

forma a borda da mesa foi projetada com uma inclinação de  $98,8^\circ$  conforme mostra a Figura 17.



**Figura 17. Vista dos detalhes da inclinação da borda da mesa e das dimensões do canal de dreno e altura da mesa (mm).**

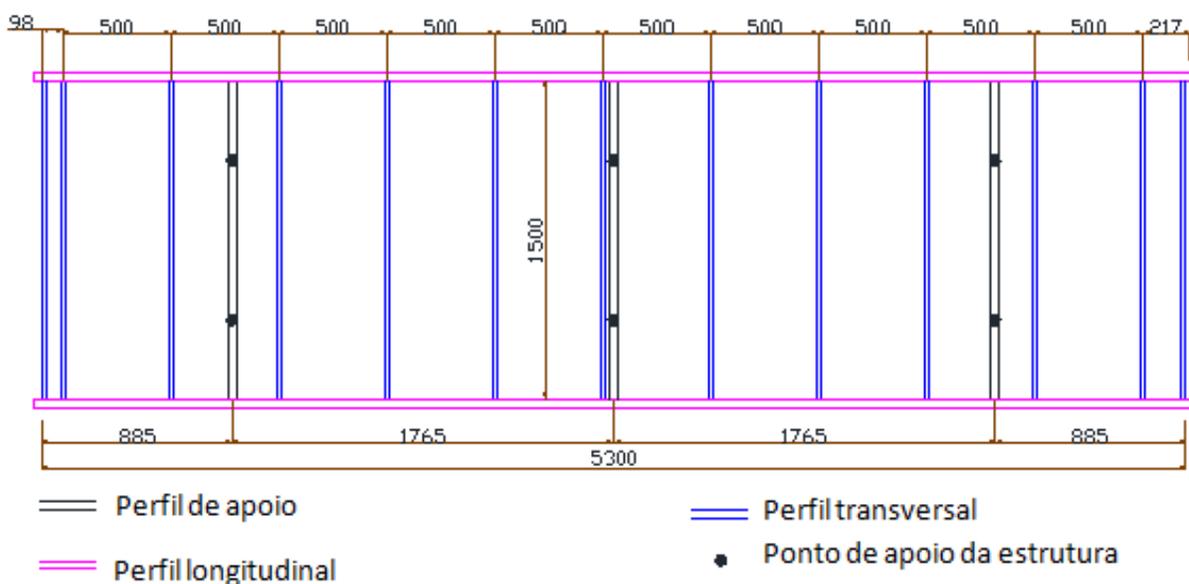
A altura da borda da mesa foi estabelecida a partir da altura média dos vasos de produção igual a 116 mm. Dessa forma, foi adotada uma altura de borda de 60 mm, ou seja 50% do valor médio, uma vez que o princípio da capilaridade permite que a água possa realizar o movimento ascendente, umedecendo todo o meio de cultivo com apenas o contato da parte basal dos vasos (MILLAR, 1988; BARRETO et al., 2012). Esse valor também foi estabelecido buscando reduzir o custo de fabricação da mesa, devido ao menor uso de material na sua moldagem.

Outro detalhe do projeto da mesa, que visa evitar acumulação de SN na mesa, foi à construção de suportes ou pés com altura regulável, permitindo o nivelamento de toda a estrutura das mesas de subirrigação.

#### **6.2.1.2. Dimensionamento estrutural da base da mesa de subirrigação**

O dimensionamento estrutural para suportar a mesa de subirrigação consistiu na escolha dos perfis comerciais de alumínio, a partir de simulações matemáticas das deformações que ocorrem com os esforços suportados pela mesa, adotando critérios de deformação máxima, e relação custo/benefício e disponibilidade do perfil no mercado.

Na Figura 18 é apresentado o projeto do suporte da mesa, onde se pode observar a opção pelo uso de três barras de apoio na estrutura devido ao comprimento da mesa, após os cálculos preliminares mostrarem que, com apenas duas barras, seria necessário adotar um perfil de alumínio com maiores dimensões e com custo mais elevado para garantir uma flecha mínima que não prejudicasse a uniformidade da lâmina de água ou SN no interior da mesa. A localização dessas barras no sentido da largura (transversal) foi definida baseada nos encaixes da mesa, região considerada crítica para deformação e ruptura, pois permitem a distribuição do peso sobre duas barras laterais (longitudinais) que por sua vez descarregam o peso nos suportes de apoio.



**Figura 18. Vista superior da estrutura de suporte da mesa de subirrigação.**

A Tabela 7 apresenta as dimensões dos perfis comerciais avaliados para serem utilizados como barras transversais da estrutura, os valores da deformação simulada de cada perfil juntamente com o peso por metro linear de perfil e a média do custo em Reais por metro. Diante dos cálculos foi selecionado o perfil com dimensões 30,0 x 20,0 x 2,0 mm, por apresentar uma deformação de 5,92 mm, valor menor que o critério adotado para deformação de 6 mm e por apresentar o menor custo por metro linear.

**Tabela 7. Valores das dimensões dos perfis comerciais e deformação máxima dos perfis transversais submetido à carga máxima, peso por metro linear e custo por metro linear de perfil.**

Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Deformação Máxima (mm)	Kg/m	R\$/m
30,0	20,0	2,0	5,92	0,454	6,33
38,1	25,4	2,0	2,72	0,599	8,36
40,0	30,0	2,5	1,48	0,810	11,30
50,8	25,4	2,0	2,11	0,737	10,28
50,8	38,1	2,0	0,83	0,874	12,19
76,0	32,0	2,0	0,87	1,080	15,07
76,2	25,4	1,6	1,77	0,813	11,34
76,2	38,1	1,6	0,72	0,921	12,85
77,0	25,0	2,2	1,39	1,107	15,45
85,5	35,0	8,0	0,25	3,823	53,33
88,9	44,5	2,0	0,36	1,354	18,89
101,6	38,1	2,0	0,45	1,422	19,84
101,6	50,8	3,2	0,16	2,392	33,36

Na Tabela 7 é possível verificar a deformação máxima encontrada na estrutura submetida a carga máxima para os perfis de alumínio selecionados para a posição longitudinal nas duas laterais da estrutura. Salienta-se que a simulação dos perfis longitudinais foi realizada com o perfil transversal já definido e sendo considerado um carregamento uniforme tanto nos perfis transversais quanto nos perfis longitudinais.

Assim, com base nas deformações e no custo do material (Tabela 7) selecionou-se o perfil de alumínio com as dimensões de 76,2 x 38,1 x 1,58 mm, que está abaixo da deformação máxima determinada e apresentar fácil disponibilidade no mercado.

Nas simulações verificou-se que os valores máximos de deformação ocorrem na extremidade da estrutura para os perfis na direção longitudinal das laterais da estrutura, no entanto, na estrutura real essas deformações podem sofrer alterações, devido ao carregamento não ser uniforme.

#### **6.2.1.1. Sistemas de adução e drenagem da mesa de subirrigação**

Para selecionar o tipo sistema hidráulico de adução a ser utilizado no protótipo foram realizados simulações de operação da mesa para os dois tipos encontrados comercialmente, com sistema de dreno aberto durante a adução e com sistema de dreno fechado durante a

adução da mesa de subirrigação, realizadas a partir das equações apresentadas no item 5.2.2.3. Na Tabela 8 são apresentados os valores do tempo de adução e drenagem, volume bombeado para o sistema de dreno aberto e fechado e as diferenças entre os tempos e volumes dos dois sistemas para as alturas de lâmina de água de 0,01, 0,03 e 0,05 m e vazões de 10, 20 e 30 L min<sup>-1</sup>. As simulações foram realizadas, utilizando os valores de largura e comprimento da mesa, de 1,58 m x 5,32 m, respectivamente, e para uma tubulação de drenagem com diâmetro de ¾” (0,1905 m), correspondendo uma área de dreno de 0,000285 m<sup>2</sup>, coeficiente de descarga adotado do dreno de 0,61.

**Tabela 8. Valores das dimensões dos perfis comerciais, e das deformações máximas dos perfis longitudinais laterais submetidas à carga máxima, peso por metro linear e custo por metro linear de perfil.**

Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Deformação Máxima (mm)	Kg/m	R\$/m
30,0	20,0	2,00	55,09	0,454	6,33
38,1	25,4	2,00	26,34	0,599	8,36
40,0	30,0	2,50	17,84	0,810	11,30
50,8	25,4	2,00	13,46	0,737	10,28
50,8	38,1	2,00	10,5	0,874	12,19
76,0	32,0	2,00	4,93	1,080	15,07
76,2	25,4	1,58	6,46	0,813	11,34
76,2	38,1	1,58	5,32	0,921	12,85
77,0	25,0	2,20	5,03	1,107	15,45
85,5	35,0	8,00	1,98	3,823	53,33
88,9	44,5	2,00	3,12	1,354	18,89
101,6	38,1	2,00	2,64	1,422	19,84
101,6	50,8	3,17	1,82	2,392	33,36

Foi observado que o tempo de adução e drenagem com o sistema de dreno aberto é maior que o sistema de dreno fechado e, conforme aumenta a altura da lâmina no interior da mesa, aumenta a diferença de tempo e volume entre os tipos dos sistemas (Tabela 9). Essa diferença implica diretamente no volume bombeado e no tempo de funcionamento da motobomba, aumentando o custo de produção pelo elevado consumo de energia elétrica. Nota-se também na Tabela 9, que o valor do tempo de adução e drenagem de SN na mesa é maior no sistema com dreno aberto em relação ao sistema com dreno fechado, pois nesse sistema a drenagem inicial ocorre junto com a adução. Dessa forma, o tempo de drenagem desse sistema equivale ao tempo de adução até atingir a lâmina requerida mais o tempo normal de drenagem

após cessar a adução, totalizando o tempo de drenagem de um sistema com dreno aberto durante a adução.

Os cálculos para realizar o manejo de tempo de adução e drenagem da lâmina de SN e altura no sistema com o dreno fechado durante a adução são mais simples que o sistema com dreno aberto. Esse fato, juntamente com outros benefícios do sistema de dreno fechado como: menor volume de SN utilizada, menos horas de funcionamento da motobomba ou menor vazão de adução em relação ao sistema de dreno aberto, e, conseqüente, menor consumo de insumos e menor custo ao produtor, optou-se por utilizar no protótipo o sistema operando com dreno fechado. Adicionalmente, optou-se por realizar o enchimento e drenagem da mesa por uma única tubulação, utilizando uma válvula de três vias.

**Tabela 9. Valores médios de tempo de adução e drenagem para os sistemas com dreno aberto e fechado durante a adução de SN, diferença entre eles, volume bombeado no sistema com dreno aberto e fechado durante a adução para diferentes valores de lâminas e vazões de adução.**

Q (L min <sup>-1</sup> )	h (m)	T adução (min)			T drenagem (min)			Vol. bombeado (L)		
		Aberto	Fechado	Dif.	Aberto	Fechado	Dif.	Aberto	Fechado	Dif.
10	0,01	66,2	8,4	57,8	76,0	9,8	66,2	662,4	84,1	578,3
	0,03	*	25,2	*	*	26,1	*	*	252,2	*
	0,05	*	42,0	*	*	39,9	*	*	420,3	*
20	0,01	7,4	4,2	3,2	17,2	9,8	7,4	148,0	84,1	63,9
	0,02	24,8	12,6	12,2	50,9	26,1	24,8	496,4	252,2	244,2
	0,05	46,5	21,0	25,5	86,4	39,9	46,5	929,9	420,3	509,6
30	0,01	3,9	2,8	1,1	13,7	9,8	3,9	118,1	84,1	34,0
	0,02	12,5	8,4	4,1	38,6	26,1	12,5	374,5	252,2	122,3
	0,05	21,9	14,0	7,9	61,8	39,9	21,9	658,2	420,3	237,9

\*Observação: Os tempos de adução e drenagem e o volume bombeado não foram quantificados porque o valor da vazão de drenagem ficou igual ao valor de vazão de adução (10 L min<sup>-1</sup>) antes de atingir as alturas de lâmina (carga hidráulica) de 0,03 e 0,05 m.

Legenda: h – altura da lâmina de SN no interior da mesa (m); Ta<sub>da</sub> - Tempo de adução da SN com sistema de dreno aberto durante a adução (min); Ta<sub>df</sub> - Tempo de adução da SN com sistema de fechado durante a adução (min); Td<sub>da</sub> - Tempo de drenagem da SN com o sistema de dreno aberto durante a adução (min); Td<sub>df</sub> - Tempo de drenagem da SN com o sistema fechado durante a adução (min).

### 6.2.1.2. Automação da mesa de subirrigação

O sistema de automação desenvolvido para a mesa de subirrigação é constituído por um painel eletrônico comandado por um relê programável da marca Metaltex, modelo Smart II, com a opção de acionamento e controle da motobomba por tempo ou por um sensor de umidade, e com desligamento da motobomba realizado por um sinal enviado por um sensor de

nível elétrico de água. O sistema possui uma motobomba da marca Schneider modelo BC-98 1/2 CV, e uma válvula de três vias (SPEARS®, U.S.A., 2013) que impede o retorno da água pela tubulação de entrada quando a tubulação é despressurizada, e direciona para a tubulação de dreno.

O sistema de automação foi projetado a partir de uma placa microprocessado, que permite a operação da mesa de subirrigação tanto por controle por tempo como pelo monitoramento da umidade do substrato, dependendo da seleção do modo de trabalho (Figura 19 A).

O sensor de nível construído de forma simples, emite um sinal para o controlador que por sua vez desliga a motobomba quando o contato da água fecha o circuito entre dois fios, cuja altura do nível pode ser ajustada a cada centímetro da mesa (Figura 19 B).



(A)



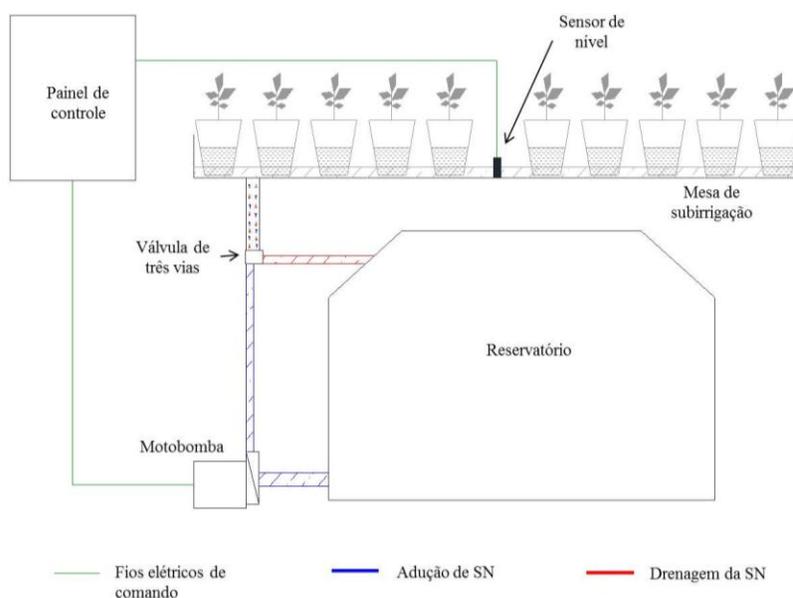
(B)

**Figura 19. Ilustração do painel de controle do sistema de automação (A), e sensor de nível para o desligamento da motobomba (B).**

O sistema funciona com o acionamento da motobomba por meio de um comando do controlador (tempo ou umidade do substrato), levando a SN do reservatório para a mesa de subirrigação. No instante em que a lâmina de SN chega ao nível desejado, o sensor de nível emite um sinal para o controlador que por sua vez desliga a motobomba. A partir desse momento inicia-se a drenagem pelo mesmo local de adução da SN, após a despressurização do sistema pela motobomba, a válvula de três vias não permite que a SN drenada, encaminhando a SN para a tubulação de dreno (Figura 20).

No modo de controle por tempo, o controlador pode acionar a motobomba em intervalos que varia de 0 a 4 horas por meio de um potenciômetro, que vai ficar ligada até a água atingir ou se elevar na altura ajustada pelo sensor de nível. No momento que a água tocar

o sensor, este envia um sinal para o controlador, que emite um sinal para o desligamento da motobomba. Já no modo umidade, o mesmo potenciômetro atua como ajuste para o percentual de umidade em que o sistema será acionado. Quando o valor da umidade no substrato ficar abaixo do valor ajustado, o sistema de bombeamento será acionado automaticamente até que receba um sinal do sensor de nível (Figura 19 A) para seu desligamento.

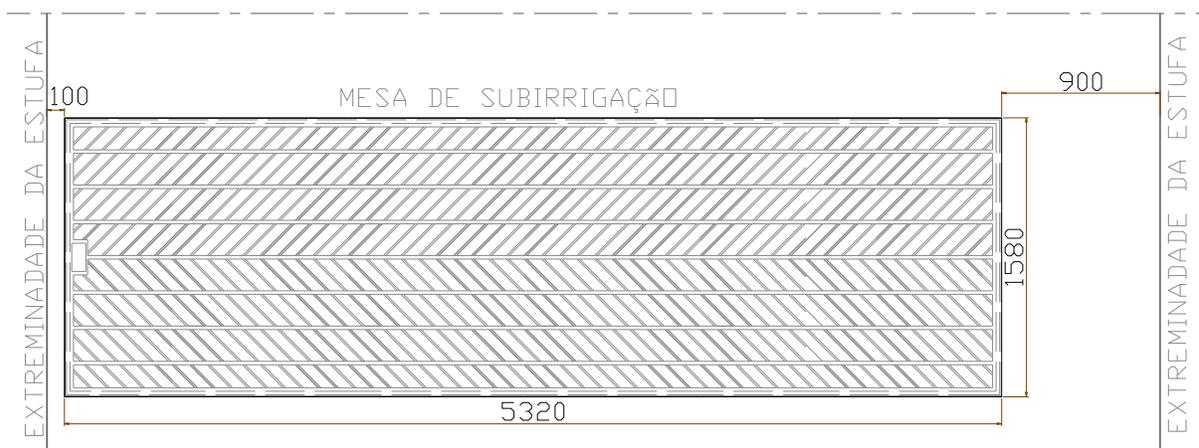


**Figura 20. Esquema das partes constituintes do sistema de automação do sistema de subirrigação.**

### 6.2.2. Construção do protótipo da mesa de subirrigação

A vista superior (Figura 21) ilustra as dimensões do protótipo da mesa de subirrigação construída.

A dimensão do comprimento foi estabelecida como 5320 mm, a partir da limitação dada pela dimensão do módulo da estufa experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola, adotando-se um corredor com 900 mm (medidas antropométricas ergonômicas), e 100 mm em cada borda da mesa (Figura 21). A dimensão de largura adotada foi de 1580 mm, definida a partir das medidas antropométricas ergonômicas recomendadas. A altura da mesa (do chão até o fundo da mesa) foi definida em 800 mm, também definida pelas medidas antropométricas ergonômicas. No entanto, o sistema de regulagem por rosca permite ajustar o valor da altura de 650 a 950 mm, e também garantir o nivelamento da mesa.

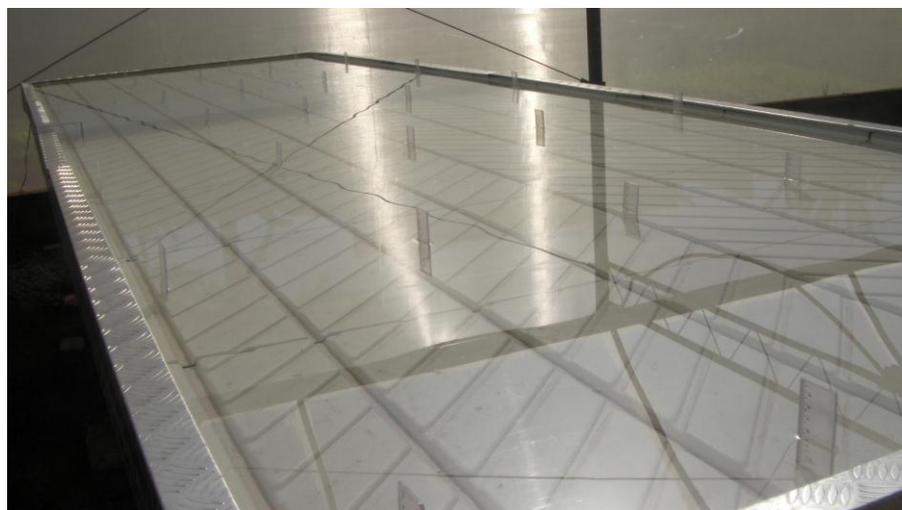


**Figura 21. Vista superior da mesa com as dimensões de comprimento e largura da mesa e largura do corredor em relação à lateral da estufa.**

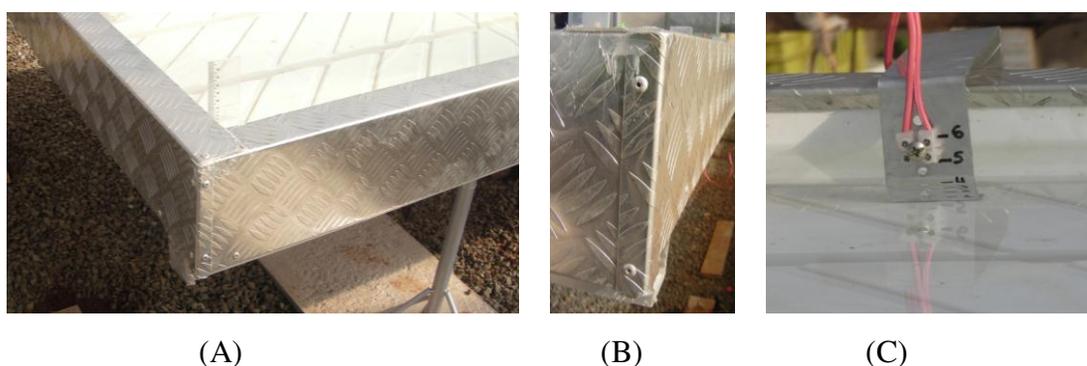
Após as definições das dimensões e característica da mesa, as partes constituintes da mesa foram moldadas e unidas para a sua instalação no Campo Experimental da FEAGRI (Figura 22). Após a instalação, a mesa foi preenchida com água até o limite máximo de lâmina por várias repetições, não apresentando nenhum vazamento nos encaixes com parafusos e guarnições entre as partes da mesa, sendo que os encaixes ficaram vedados e sem espaços para acúmulo de impurezas ou patógenos. No entanto, o processo de montagem e vedação dos módulos adotados se mostrou trabalhoso e demorado por ser realizada de forma caseira e manual, requerendo que se busque uma forma mais prática e rápida de encaixar as partes da mesa para uma produção em serie.

Um acessório que se mostrou útil na instalação da mesa foi os suportes com altura ajustável, que permitiu fazer a regulagem ideal para manter a mesa em nível, e consequentemente, a manter a uniformidade da lâmina de água.

Após a montagem da mesa, se mostrou necessário a inserção de uma proteção de alumínio nas laterais, para evitar riscos de quebra devido a choques ou trombadas. Também se teve o cuidado de se vedar todas as quinas cortantes da mesa com chapas de alumínio dobrada e rebitada, respeitando as normas de segurança do trabalhador (Figura 23 A e B).



**Figura 22. Vista da mesa de subirrigação instalada na estufa experimental da FEAGRI/UNICAMP.**



**Figura 23. Vista do detalhe da vedação das partes cortantes da mesa (A e B) e detalhe do sensor de nível para o manejo da lâmina de SN.**

O sensor de nível da mesa também permitiu ajustar a lâmina de SN no interior da mesa a cada centímetro, sendo possível fazer um manejo de altura da lâmina de SN de 10 a 60 mm (Figura 23 C). Entretanto, é preciso ainda estudar melhor o posicionamento do sensor de forma a evitar a desuniformidade da lâmina de irrigação, pois há pontos na mesa que podem sofrer deformações, onde a leitura da altura da lâmina pelo sensor de nível pode ser diferente da ajustada .

### 6.2.3. Análise do custo de fabricação do protótipo da mesa de subirrigação

A Tabela 10 apresenta a relação dos materiais e os correspondentes custos que foram utilizados na confecção do protótipo da mesa de subirrigação instalada na estufa experimental da FEAGRI. No valor do custo total, não está incluído os custos com mão-de-obra.

Observa-se na Tabela 10, que o custo total do material para instalação da mesa de subirrigação na estufa experimental da FEAGRI, incluindo reservatório, sistema de bombeamento e automação foi de R\$ 3.367,20, gerando um custo por metro quadrado de R\$ 395,00. Nos EUA um sistema de mesas de subirrigação custa em torno de \$ 44,00 a \$ 65,00 (cerca de R\$ 88,00 a R\$ 130,00) por metro quadrado, onde está incluso todo o sistema, menos a parte elétrica de automação (COX, 2013) É importante observar que o custo com material pode diminuir a partir de um processo de produção em escala.

**Tabela 10. Custo do material para a montagem e instalação da mesa de subirrigação na estufa experimental da FEAGRI.**

<b>MATERIAL</b>	<b>CUSTO (R\$)</b>
Perfis de alumínio	875,00
Eletrodos	140,00
Apoios	130,00
Painel eletrônico	1.000,00
Placas de PSAI	276,00
Moldagem	240,00
Motobomba	279,00
Reservatório	219,00
Material de encaixe da mesa	88,20
Tubulação e conexões	120,00
	<b>3.367,20</b>

Para realizar uma estimativa do custo de mão de obra considerou-se o tempo total de trabalho de 12 horas de mão de obra especializada mais 12 horas de mão de obra de um ajudante, utilizadas para montar a mesa, soldar a estrutura e realizar a instalação da mesa na estufa experimental. Considerando o custo horário da mão de obra especializada de aproximadamente R\$ 35,00 e do ajudante a R\$ 15,00 obteve-se um custo total de mão de obra de R\$ 600,00.

O custo para fabricação dos moldes da mesa de subirrigação pela empresa terceirizada foi de R\$ 7.790,00. Entretanto, esse valor deve ser depreciado ao longo de sua vida útil e pelas unidades de peças produzidas. Após a sua fabricação, o custo de produção das peças será apenas do serviço de moldagem e do material utilizado para moldar as partes da mesa, e quando for realizada a moldagem em escala comercial, o custo do molde pode representar uma parte menor do custo total.

Somando-se todos os custos envolvidos na fabricação e montagem do protótipo da mesa de subirrigação chega-se ao valor total de R\$ 11.757,20, gerando um custo por metro quadrado de R\$ 1.378,66.

### **6.3. Avaliação da mesa de subirrigação**

#### **6.3.1. Avaliação dos parâmetros de operação**

Na Tabela 11 apresentam-se os valores médios do tempo de adução e drenagem, do volume aduzido na mesa, da altura média da lâmina de água no interior da mesa, das vazões de adução e de drenagem, coletados para as combinações ensaiadas de vazão e altura de água no interior da mesa. Os valores experimentais estão disponíveis na Tabela 19 no anexo III.

Pode-se observar na Tabela 11, que os valores médios de adução ficaram próximos dos valores pré-determinados de 10 e 20 L min<sup>-1</sup>, com exceção dos valores correspondentes a 30 L min<sup>-1</sup>, que apesar do registro operar totalmente aberto, a perda de carga gerada pelas tubulações e, principalmente, pela válvula de 3 vias, devido a velocidade da água no interior da tubulação, alcançou em média a uma vazão de 27,04 L min<sup>-2</sup>, mostrando limitação de se usar a motobomba selecionada para atingir a vazão requerida de adução para a mesa de subirrigação.

Verificaram-se também as combinações de altura e vazão determinaram uma variação de 9,43 a 78,40 minutos no tempo total de permanência de água na mesa, a qual fornece flexibilidade de operação e permite realizar diferentes tipos de manejos hídricos nutricional para diferentes plantas. Ribeiro et al (2012) avaliando um sistema de subirrigação para mudas de eucalipto, verificou que o manejo hídrico nutricional empregava uma altura de lâmina média de 0,036 m e um tempo de contato médio de 47 minutos. No entanto, é preciso enfatizar

que cada cultura exige um tipo de manejo, assim o sistema de adução, drenagem e altura da lâmina de SN devem ser reguláveis.

É possível também verificar na Tabela 11 que as médias dos valores dos volumes aduzidos em suas respectivas alturas (103,7, 318,3 e 500,0 L), são superiores aos calculados (84, 252 e 420 L) em 23,5, 26,3 e 19,1% respectivamente, para as lâminas com altura de 0,01, 0,03 e 0,05 metros. Isso possivelmente ocorreu devido à deformação ocorrida na mesa pelo peso da água que gerou um aumento na capacidade da mesa. Pela mesma razão, observou-se que os valores das lâminas médias no interior da mesa foram maiores que o valor da lâmina de manejo proposta.

**Tabela 11 .Valores médios dos tempos de adução, drenagem e tempo total de permanência de água na mesa , volume de água aduzido na mesa, altura da lâmina de água no interior da mesa, vazões de adução e drenagem para as combinações de vazão e altura de lâmina.**

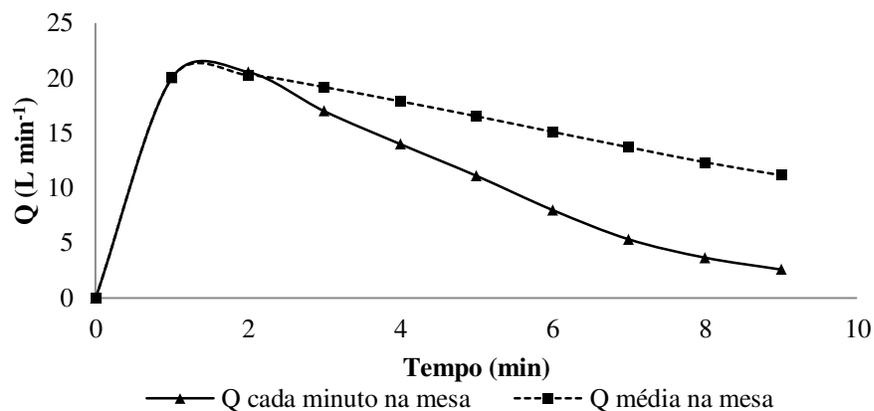
Q (L min <sup>-1</sup> )	h Lâmina (m)	Tempo Adução (min)	Tempo Drenagem (min)	Tempo de permanência (min)	Volume aduzido (L)	h médio (m)	Vazão adução (L min <sup>-1</sup> )	Vazão drenagem (L min <sup>-1</sup> )
10	0,01	9,99	5,50	15,49	99,3	0,010	9,94	14,61
	0,03	31,12	17,00	48,12	322,9	0,035	10,40	17,47
	0,05	51,57	26,83	78,40	501,8	0,057	9,73	17,13
20	0,01	5,51	6,00	11,51	108,7	0,011	19,73	15,67
	0,03	16,25	17,00	33,25	319,0	0,035	19,63	17,57
	0,05	25,08	27,17	52,25	496,2	0,057	19,79	17,18
30	0,01	3,76	5,67	9,43	103,2	0,010	27,43	15,06
	0,03	11,53	16,83	28,36	313,0	0,035	27,14	17,49
	0,05	18,93	26,50	45,43	502,2	0,056	26,55	17,81

Obs.: média de três repetições

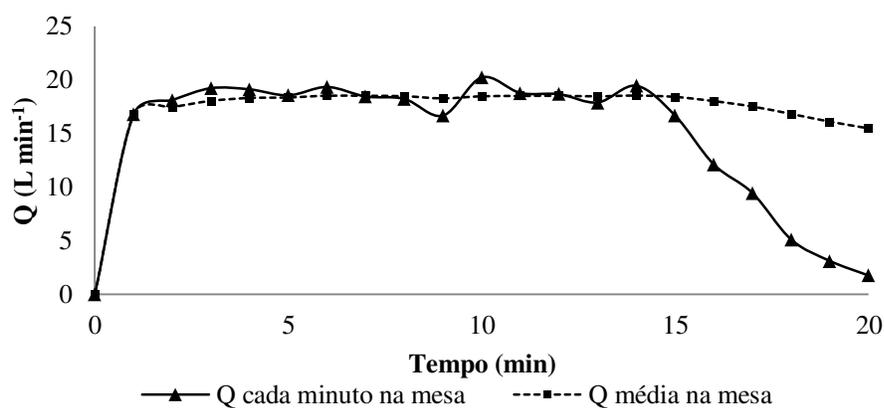
Foi observado nos testes, que a válvula de três vias, retornava água para o reservatório na condição de valores de vazões de 10 L min<sup>-1</sup> para a lâmina de 0,05 m, o que aumentou o tempo de adução, devido ao retorno de parte da água aduzida ao reservatório. Esse retorno ocorre devido a menor velocidade de escoamento na tubulação nessa condição quando comparada a vazões maiores, e também pela existência de uma carga hidráulica contra o fluxo de adução, fazendo com que a água retorne ao reservatório no momento da adução.

O valor médio da vazão de drenagem foi 15,1, 17,5 e 17,4 L min<sup>-1</sup>, respectivamente para as alturas de lâminas ensaiadas de 0,01, 0,03 e 0,05 m. Observa-se que o valor da altura de lâmina de 0,01 m apresentou a menor vazão de drenagem devido a menor carga hidráulica.

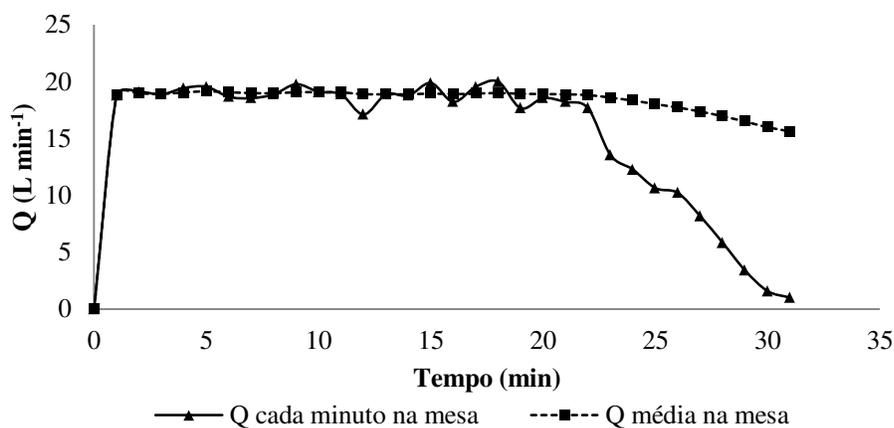
As Figura 24 A, B e C apresentam a variação temporal média da vazão de drenagem a cada minuto e também a média da vazão para os três valores de altura de lâminas estudados.



(A)



(B)



(C)

**Figura 24. Variação temporal média da vazão de drenagem a cada minuto e a vazão média da mesa de subirrigação com lâminas de água de 0,01 (A), 0,03 (B) e 0,05 (C) m de altura.**

Pode-se verificar na Figura 24 (B e C), correspondente aos valores de lâmina de 0,03 e 0,05 m, que os valores das vazões de drenagem variam em torno da média ao longo do processo e, apenas próximo do final da drenagem ocorre a diminuição. Esse comportamento ocorre devido a existência de um defletor no orifício de adução e drenagem, utilizado para evitar jatos de água durante a adução, e que no processo de drenagem sua área de escoamento diminui com a redução da lâmina no interior da mesa (Figura 25). Já no caso da lâmina de 0,01 cm, mostrado na Figura 24 (A), a queda nos valores de vazão de drenagem ocorre mais rapidamente no início do processo, pois além de ter menor carga hidráulica que as outras lâminas, o nível de água fica o tempo todo abaixo da altura do defletor no orifício de dreno, adicionado ao fato que a área de escoamento do dreno diminui com a lâmina no interior da mesa.



**Figura 25. Vista do detalhe do orifício de adução e drenagem da mesa de subirrigação, do rebaixamento das canaletas e a válvula defletora.**

### 6.3.2. Análise de deformação no interior da mesa

A Tabela 12 apresenta o valor médio, desvio padrão e o coeficiente de variação das alturas da lâmina de água no interior da mesa de subirrigação para as lâminas de 0,01, 0,03 e 0,05 m.

**Tabela 12. Valores médios da altura de lâmina e coeficiente de variação.**

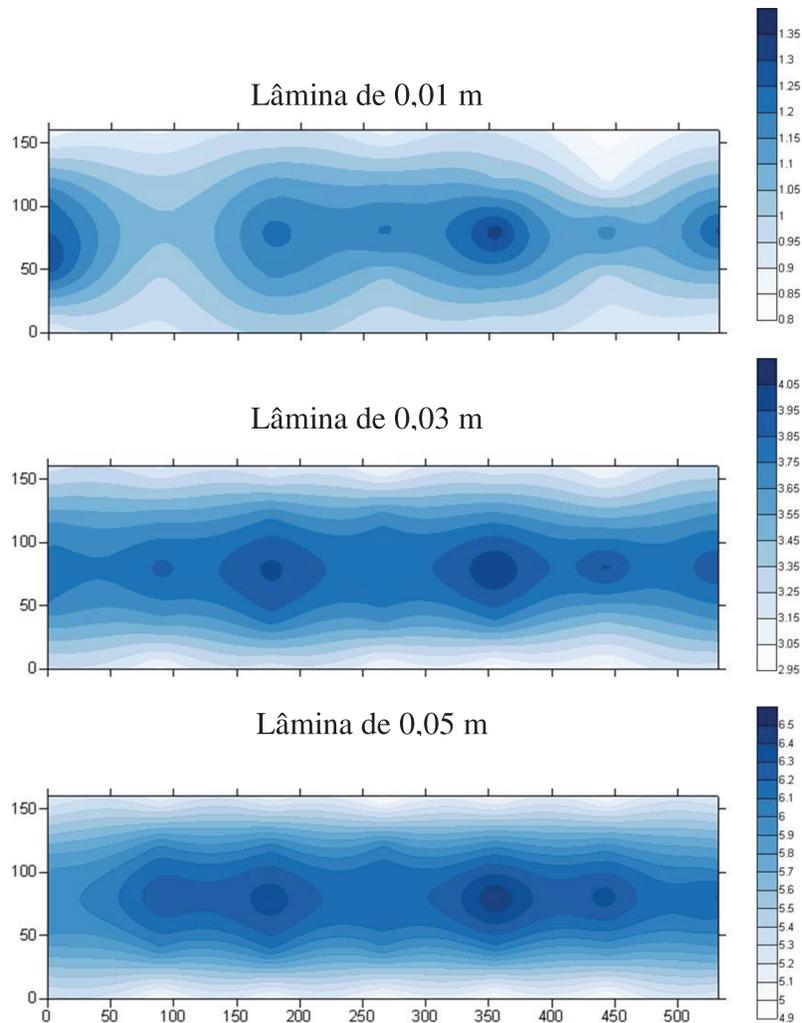
Lâmina (m)	Média da lâmina (m)	h máximo da lâmina (m)	Coefficiente de Variação
0,01	0,0103	0,0133	0,13
0,03	0,0349	0,0406	0,10
0,05	0,0566	0,0650	0,09

Observa-se na Tabela 12, que os valores médios da altura da lâmina de água no interior da mesa ficaram acima dos valores estabelecidos no sensor de nível, devido as deformações originadas pelo peso da água. Verifica-se também que para as alturas de lâmina de 0,01, 0,03 e 0,05 m, os valores máximos medidos no interior da mesa foram de 0,0133 (33%), 0,0496 (65%) e 0,0650 (30%) m, com valores de coeficiente de variação 0,13, 0,10 e 0,09, respectivamente, mostrando a redução da variação com o aumento da altura da lâmina de água no interior da mesa, isso deve ter ocorrido devido ao aumento da altura da lâmina ser proporcionalmente maior que a deformação de todo o conjunto da estrutura. Salienta-se que, quanto menor a variação da altura da lâmina de SN no interior da mesa mais uniforme será a lâmina de irrigação e, conseqüentemente, maior será a uniformidade de produção da cultura.

A Figura 26 apresenta a variação dos valores da altura da lâmina de água no interior da mesa, para os testes com lâminas de 0,01, 0,03 e 0,05 m de altura, permitindo inferir também a deformação causada na estrutura de suporte da mesa de subirrigação pelo carregamento. Pode-se observar na Figura 26, que o aumento da altura da lâmina de água no interior da mesa, aumentou a diferença na lâmina entre os pontos medidos e, conseqüentemente, a deformação da mesa. As maiores diferenças das lâminas ocorreram no meio da mesa no sentido da largura (transversal), a aproximadamente a 1/3 e a 2/3 do sentido do comprimento (longitudinal) onde estão localizados os vãos entre as barras de apoio da estrutura.

Pode-se também verificar que as deformações atingiram valores acima dos valores calculados no projeto (de 0,006 m), chegando a deformações de 0,015 m em alguns pontos, para a lâmina de 0,05 m. Isso ocorre porque as deformações na estrutura faz com que a água se acumule na mesa em determinados pontos e, onde alguns valores ultrapassaram os valores assumidos para o cálculo, gerando uma deformação maior que a calculada.

As deformações observadas de 0,015 m na superfície da mesa, podem ser um agravante quando forem inseridos os recipientes de produção com as plantas, pois o peso sobre a estrutura da mesa vai aumentar, aumentando as deformações que podem reduzir a uniformidade de produção da cultura. Portanto, o dimensionamento da estrutura deve ser reanalisado considerando o volume do recipiente e a cultura.



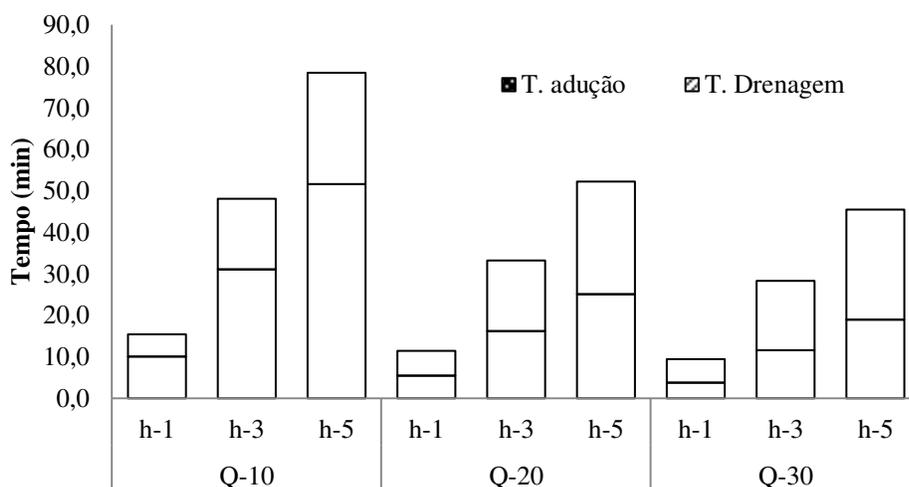
**Figura 26.** Valores da altura da lâmina de água medida no interior da mesa de subirrigação para as alturas de 0,01, 0,03 e 0,05 m.

### 6.3.3. Simulações operacionais de manejo

A somatória do tempo de drenagem e do tempo de adução fornece tempo de permanência de água no interior da mesa de subirrigação. Com esse valor é possível estimar o diâmetro de saída do dreno para atender a necessidade de manejo da cultura, e reduzir os riscos de contaminação por patógenos via água.

Na Figura 27, é possível verificar os valores simulados do tempo total de permanência de água no interior protótipo da mesa de subirrigação, calculados pela somatória do valor do tempo de adução e drenagem, estimados a partir dos dados experimentais apresentados Tabela 19 no anexo III. A determinação desse parâmetro permite verificar o

tempo que a SN permanece em contato com as plantas, e auxilia o produtor para realizar o manejo hídrico das culturas.



**Figura 27. Valores do tempo de permanência de água no interior da mesa de subirrigação para as condições de vazão e altura de lâminas estudadas.**

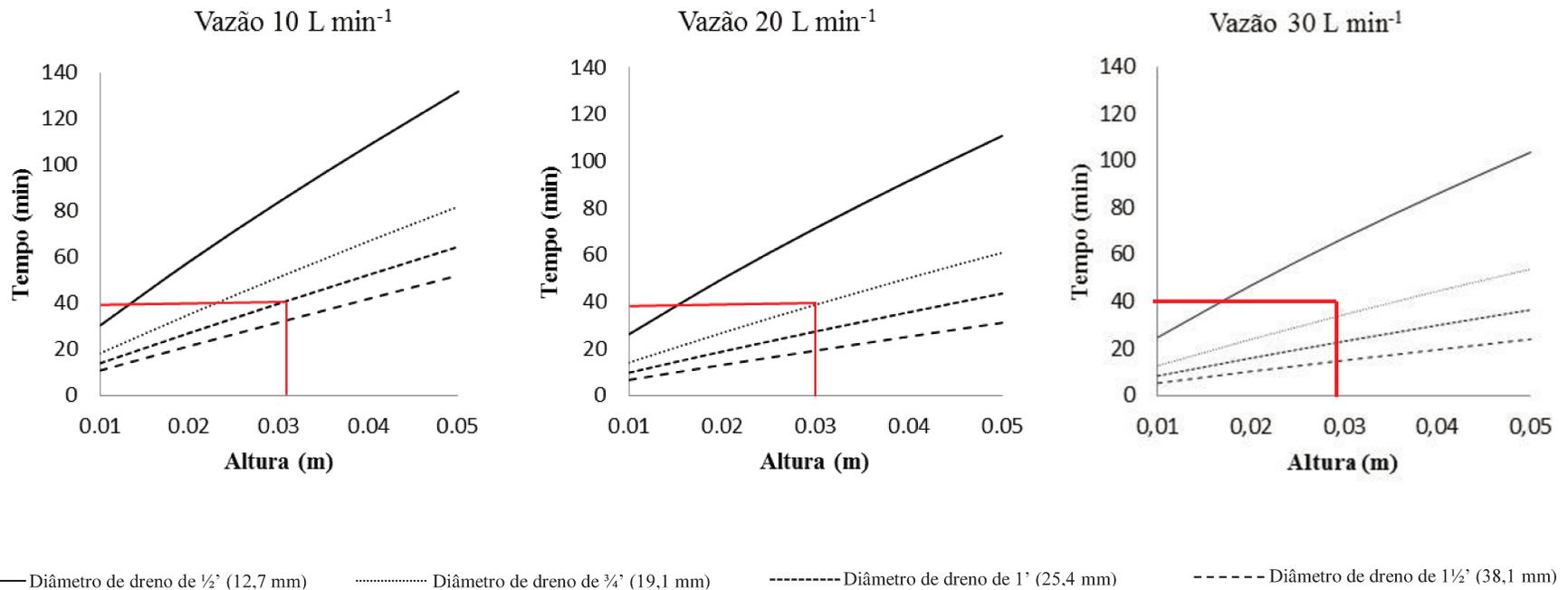
Observa-se na Figura 27, que o maior tempo de permanência de SN no interior da mesa ocorre para a vazão de 10 L min<sup>-1</sup>, para os respectivos valores de lâminas. No entanto, como o tempo de drenagem na mesa é praticamente igual para as mesmas alturas de lâminas, as diferença entre o tempo de permanência da SN no interior diminui conforme aumenta a vazão de adução, como se pode observar nas vazões de 20 e 30 L min<sup>-1</sup>. O tempo de permanência da água ou SN no interior na mesa está relacionado com problemas de fitopatógenos que podem ser transmitidos ou transferidos de uma planta para outra pela água. Assim, quando menor o tempo de permanência de SN no interior da mesa mais seguro, ou menos riscos a planta estará sujeita, desde que atenda o tempo de saturação.

A Figura 28 apresentam as simulações, para as vazões de 10, 20 e 30 L min<sup>-1</sup>, respectivamente, realizadas a partir de diâmetros comerciais de dreno, possibilitando a escolha do dreno conforme a necessidade de manejo de altura da lâmina e tempo de permanência da SN no interior da mesa.

Pode-se exemplificar a utilização dos gráficos da Figura 28 com a seguinte situação: supondo que uma determinada cultura exigisse que o tempo de contato das raízes com a SN fosse de 40 minutos na altura de 0,03 metros, o diâmetro do dreno selecionado deveria ser de

1' (25,4 mm) para a vazão de  $10 \text{ L min}^{-1}$  ou de  $\frac{3}{4}$ ' (19,1 mm) para as vazões de 20 e  $30 \text{ L min}^{-1}$ .

Dessa maneira, a partir da escolha da vazão de projeto e da área do dreno da mesa de subirrigação é possível se ter uma flexibilidade no manejo e operação, que permite sua adequação para diferentes tipos de cultura, pela determinação da altura e tempo de permanência da SN no interior da mesa.



**Figura 28.** Valores de tempo de permanência no interior da mesa em função da altura de lâmina requerida para os diâmetros comerciais de dreno de 1/2' (12,7 mm), 3/4' (19,1 mm), 1' (25,4 mm) e 1 1/2' (38,1 mm) e vazões de 10, 20 e 30 L min<sup>-1</sup>.

## 7. CONCLUSÕES

A partir do estabelecimento da hipótese e da sua validação pela realização dos objetivos específicos foi possível concluir:

- Não foram localizadas no mercado nacional empresas que fabricam ou comercializam especificamente equipamentos de subirrigação, sendo que os sistemas encontrados em operação são constituídos de equipamentos construídos a partir de pedidos específicos dos produtores, e dimensionados empiricamente, sem aplicação de critérios de projeto de engenharia.
- O sistema de subirrigação comercial avaliado apresentava baixos valores de eficiências de irrigação e de aplicação, causadas pela alta frequência de irrigação, perdas por vazamentos e descartes de SN.
- Os critérios de projeto da mesa de subirrigação atenderam padrões ergonômicos antropométricos e de segurança, aplicabilidade e funcionalidade, e material de construção.
- O projeto da mesa de subirrigação foi elaborado para possibilitar a sua moldagem em módulos com comprimento de 0,5 m e a sua montagem com diferentes dimensões, viabilizando a instalação do equipamento em ambientes protegidos com diferentes tamanhos e a obtenção de uma maior eficiência de ocupação da área de produção para atender o critério de aplicabilidade e funcionalidade.
- A mesa possui controle da altura da lâmina de SN variando de 10 a 50 mm em intervalos de 10 mm e controle da vazão que reflete no tempo de adução e drenagem, possibilitando atender o uso de diferentes recipientes de produção e as exigências de diferentes culturas.
- A operação automatizada da mesa de subirrigação, a partir do controle preciso de nível da lâmina de água e com reuso da SN, auxilia na redução de descartes diretos no meio ambiente.

A mesa de subirrigação projetada e construída a partir da aplicação de critérios de projeto de engenharia, com automação do sistema de manejo e reutilização da SN, apresentou potencial para ser produzida em série, podendo ser aplicada para diferentes recipientes de produção, culturas e manejos de irrigação.

## 8. RECOMENDAÇÕES

No decorrer dessa pesquisa foram feitas algumas observações consideradas relevantes para a continuação desse estudo ou para o desenvolvimento de novos trabalhos nessa área:

- O processo de união dos moldes na fabricação da mesa de subirrigação necessita de aprimoramentos. Apesar de a vedação se mostrar eficiente, o encaixe das peças com parafusos e guarnição em um molde com 3 mm de espessura, demandou muitos parafusos, aumentando o peso da estrutura e demandando um tempo excessivo na etapa de montagem, limitante para uma produção em escala.
- Como o difusor utilizado apresentou problemas de operação para a vazão de 30 L min<sup>-1</sup>, jogando água para fora da mesa devido à velocidade e pressão do jato de água, é preciso testar e analisar outros tipos de difusores no sistema de adução e drenagem da mesa de subirrigação.
- A válvula de três vias que possibilitou a adução e drenagem da mesa por um mesmo ponto é importada. Assim, é necessário buscar um produto similar no mercado nacional ou projetar uma válvula com a mesma função e de baixo custo, para não incrementar o custo de produção e de instalação de sistemas de subirrigação, pois se utiliza uma válvula por mesa e os sistemas operam com várias mesas.
- Nessa pesquisa optou-se por desenvolver uma estrutura fixa para a mesa projetada. Em trabalhos futuros, deve se buscar o desenvolvimento de um sistema móvel para o deslocamento das mesas, para se atingir uma maior eficiência de operação. Dessa forma, também se faz necessário projetar um sistema de engate e desengate rápido da tubulação de adução e drenagem da mesa de subirrigação.
- É preciso reestudar a opção de se utilizar um sistema de automação e controle mesas baseado em sensores de nível da água ou de umidade no substrato que requerem o uso de fios ou cabos, o que pode limitar a movimentação das mesas.
- Como a avaliação hidráulica foi realizada sem a presença de recipientes com substratos, é necessária a realização de testes para verificar se a deformação da estrutura carregada com mais peso não interfere na uniformidade da umidade dos substratos.

- Adicionalmente, é preciso verificar nesses ensaios com recipientes e substrato se o dreno utilizado é eficiente na remoção da quantidade de substratos liberados, e se o processo de limpeza das impurezas retidas é adequado.
- É preciso avaliar o efeito da localização do orifício de adução e drenagem no tempo de contato da SN com os recipientes e na uniformidade da umidade dos substratos.
- Deve ser realizada uma análise de viabilidade econômica para uso da mesa de subirrigação em diferentes culturas comparando com outros sistemas de irrigação utilizados em ambiente protegido e avaliando-se as limitações, problemas e vantagens gerados pela interação equipamento-planta
- O método de dimensionamento da estrutura da mesa de subirrigação gerou uma estrutura com dimensões que apresentou uma deformação de 0,015 m para a lâmina de 0,05 m de água, acima do valor assumido como recomendado. O dimensionamento deve ser refeito considerando o peso da água somado ao recipiente de produção, meio de cultura úmido e cultura.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. *Fundamentos e aplicações do alumínio*. Comunicação técnica. Mai. 2007. Disponível em: <[www.alcoa.com/brazil/pt/alcoa\\_brazil/.../fundamentos-Alumínio.pdf](http://www.alcoa.com/brazil/pt/alcoa_brazil/.../fundamentos-Alumínio.pdf)>. Acesso em 20 de março de 2012.

AGUIAR, L. A.; DAREZZO, R. J.; ROZANE, D. E.; AGUILERA, G. A. H.; SILVA, D. J. H. *Cultivo em ambiente protegido: histórico, tecnologia e perspectivas*. Viçosa, MG, UFV; 2004, 332p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMUTH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998 30 p. (Irrigation and Drainage, Paper 56.)

ANDRIOLO, J. L.; BOEMO, M. P.; BONINI, J. V. Crescimento e desenvolvimento de mudas de tomateiro e melão empregando os métodos de irrigação por microaspersão, inundação subsuperficial e flutuação. *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 19, n. 3, p. 200-203, nov. 2001.

ANSYS Software Mechanical APLD Utility<sup>®</sup>. Southpoint, Release 13.0, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA, EUA, November 2010.

ANTONSSON, E. K. Development and testing of hypotheses in engineering design research., *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, ASME, New York, NY, EUA, v. 109, n. 2, p.153-154, jun. 1987.

BARRETO, C. V. G. *Uso da irrigação por capilaridade na produção de mudas de citros na fase de tubetes*. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2010.

BARRETO, C. V. G.; TESTEZLAF, R.; SALVADOR, C. A. Ascensão capilar de água em substratos de coco e pinus. *Bragantia*, Campinas, SP, v. 71, n 3, p.385-393, out. 2012.

BEYTES, C. Greenhouses Upgrades Part I: A Transplanter! No, Booms! No, a Seeder. *Revista Grower Talks*, fev. 2009. Disponível em: <<http://www.ballpublishing.com/GrowerTalks/ViewArticle.aspx?articleid=16909>>. Acesso em 19 de junho de 2011.

BLISKA JUNIOR, A. e HONÖRIO, S. L. *Cartilha tecnológica: Plasticultura e estufa*. FEAGRI/UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1996. 51p.

BOUERI FILHO, J. J. *Projeto de dimensionamento dos espaços da habitação: espaço atividades*. Livro II, São Paulo, SP, Estação das letras e cores, 2008. 36p.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P. da; MIRANDA, J. H. de. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. *Engenharia Agrícola* [online], Jaboticabal, SP, v.30, n.4, p.608-618, jul./ago. 2010.

COX, D. A. Subirrigation for greenhouses crops. Umass Extension, Center For Agriculture, College of Natural Sciences. Disponível em: <http://extension.umass.edu/floriculture/fact-sheets/subirrigation-greenhouse-crops>. Acesso em 15 de janeiro de 2013.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA, DEG. Universidade Federal de Lavras – UFLA. Disponível em: <http://www.deg.ufla.br/site/>. Acesso 3 de Novembro de 2012.

DOCSTOC. Documents & Resources for Small Businesses & Professionals. *Vertedores e Orifícios*. Disponível em: <http://www.docstoc.com/docs/122292915/vertedores-e-orif%EF%BF%BDcios>. Acesso em 17 de outubro de 2012.

DUMROESE, R. K.; PINTO, J. R.; JACOBS, D. F.; DAVIS, A. S.; HORIUCHI, B. Subirrigation reduces water use, nitrogen loss, and moss growth in a container nursery. *Native Plants Journal*, Green Bay, WI, EUA, v. 7, n. 3, p.253-261, mar./jun. 2006.

FARIAS, J. R. B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. R.; Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, RS, v.2, p.17-22, fev. 1994.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; ARAÚJO, J. A. C.; Utilização do tanque classe A para a estimativa da evapotranspiração de referência dentro de casa de vegetação. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.24, n.1, p.46-50, jan./abr. 2004.

FERRAREZI, R.S. e VAN IERSEL, M.W. Monitoring and controlling subirrigation with soil moisture sensors: A case study with hibiscus. In: SNA RESEARCH CONFERENCE PROCEEDINGS, 2011, Mobile, AL, EUA. In press. Water management section, p. 187-191 2011.

FERRAREZI, R.S.; VAN IERSEL, M.W.; TESTEZLAF, R. Different water heights influence substrate soil moisture in: subirrigation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2012, Valencia, Spain, jul. 2012.

FERREIRA FILHO, A. C.; TESTEZLAF, R.; FERRAREZI, R. S.; RIBEIRO, M. D.; MARTARELLO, V. D. Efeito da altura de aplicação de água e do tempo de subirrigação na umidade da casca de pinus em tubetes. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO E DO CARIBE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 10, E CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 41, 2012, Londrina/PR. *Anais, Jaboticabal: SBEA*, 2012. CD Rom. 2012

FIGUEIREDO, G. Panorama da produção em ambiente protegido. *Revista Casa da Agricultura*. CATI, Campinas, SP, v. 14, n. 2, p. 10-11, abr./maio/jun. 2011.

FISHER R. Troubled Waters? *Revista Grower Talks*. Disponível em: <<http://www.ballpublishing.com/GrowerTalks/ViewArticle.aspx?articleID=14336&highlight=ebb+and+flow>>. Acesso em 17 junho de 2011.

FLORIDA, ESTUFAS AGRÍCOLAS. Disponível em: <<http://www.floridaestufas.com.br/>>. Acesso em 10 de março de 2012.

GERALDO BARENTSE. Plantas Ornamentais, Sitio KiFlor, Holambra, SP. Disponível em: <<http://www.barendse.com.br/>>. Acesso em 20 de Novembro de 2012.

GODOI, R. S.; ANDRIOLO, J. L.; FRANQUÉZ, G. G.; JÄNISCH, D. I.; CARDOSO, F. L.; BRAZ VAZ, M. A. Produção e qualidade do morangueiro em sistemas fechados de cultivo sem solo com emprego de substratos. *Revista Ciência Rural*, Santa Maria, RS, v.39, n.4, p.1039-1044, jul, 2009.

GORNI, A.A. Recursos básicos sobre plásticos e polímeros. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/textpol.html>>. Acesso em 19 de março de 2012.

GRASSI, V.G., FORTE, M.M.C., PIZZOL, M.F.D. Aspectos morfológicos e relação estrutura-propriedades de poliestireno de alto impacto. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, [online] São Carlos, SP, v. 11, n 3, p. 158-168, jul./set. 2001.

GREWAL, H. S.; MAHESHWARI, B.; PARKS, S. E. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: an Australian case study. *Agricultural Water Management* [online], Elsevier, Amsterdam, NL, v. 98, n. 5, p. 841-846, mar. 2011.

HEERMANN, D.F & SOLOMON, K.H. Efficiency and uniformity. In. HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOTT, R.L. *Design and operation of farm irrigation systems*. v. 2, St Joseph, MI, EUA, ASABE, 2007, p. 108-119.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Senso agropecuário 2006*. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp>>. Acesso em 24 de junho de 2011.

ILDA, I. *Ergonomia: projeto e produção*. São Paulo, SP, Edgard Blücher Ltda., 1992, p. 97-128.

INTERNATIONAL PAPER BRASIL, Mogi Guaçu, SP. Disponível em: <<http://www.internationalpaper.com/BRAZIL/PT/Company/Facilities/MogiGua%C3%A7u.html>>. Acesso em 03 de novembro de 2012.

JAMES GREENHOUSES. Perennial plugs and specialty propagation. Disponível em: <[www.jamesgreenhouses.com](http://www.jamesgreenhouses.com)>. Acesso em 3 de Novembro de 2012.

KELLER, J.; KARMELI, D. *Trickle irrigation design*. Glendora, CA, EUA, Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.

KHANDANI, S. *Engineering design process*. Education Transfer Plan. Industry Initiatives for Science and Math Education (IISME), ago. 2005.

LAGE, R. Plasticultura e cultivo protegido: Informações e planejamento são indispensáveis. *Revista Casa da Agricultura*. CATI, Campinas, SP, v. 14, n. 2, p. 10-11, abr./maio/jun. 2011.

LIU, J., LEATHERWOOD, W. R., & MATTSON, N. S. Irrigation method and fertilizer concentration differentially alter growth of vegetable transplants. *HortTechnology*, ASHS, Alexandria, VA, EUA, v. 22, n. 1, p. 56-63, fev. 2012.

LUZ, G. O. *Comparação entre dois sistemas hidráulicos de medição de água de irrigação de arroz*. 2011, 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, Santa Maria, RS, 2011.

MAJSZTRIK, J. C.; RISTVEY, A. G.; LEA-COX, J. D. Water and nutrient management in the production of container-grown ornamentals. *Horticultural Reviews*, [online], Hoboken, NJ, EUA, v. 38, p. 253-298, fev. 2011.

MANGIAFICO, S. S.; NEWMAN, J.; MOCHIZUKI, M.; ZURAWSKI, D.; MERHAUT, D. J.; FABER, B. Nurseries surveyed in Southern California adopt best practices for water quality. *California Agriculture*, California, EUA, v. 64, n. 1, p. 26-30, 2010.

MCAVOY, R. J. Ebb and flow cropping systems, in the greenhouses. *American Vegetable Grower*. Willoughby, OH, EUA, n.14, p.46-54, mai. 1996.

MEADOR, D. P.; FISHER, P. R.; HARMON, P. F.; PERES, N. A.; TEPLITSKI, M.; GUY, C. L. Survey of physical, chemical, and microbial water quality in greenhouse and nursery irrigation water. *HortTechnology*, ASHS, Alexandria, VA, EUA, v. 22, n. 6, p.778-786, dez. 2012.

MELLANO, V.J. Runoff & Nonpoint Source Pollution Self-Assessment. Greenhouses& Container Nurseries. *Agwater quality program*. University of California Cooperative Extension Condado de São Diego. Disponível em: <<http://cesandiego.ucdavis.edu/files/8455.pdf>>. Acesso em 24 de junho de 2011.

MILLAR, A.A. *Drenagem de terras agrícolas: bases agrônômicas*. São Paulo, SP, Editerra Editorial Ltda., 1988.

MILLION, J.; YEAGER, T.; LARSEN, C. Water Use and Fertilizer Response of Azalea Using Several No-leach Irrigation Methods. *HortTechnology*, ASHS, Alexandria, VA, EUA, v. 17, n. 1, jan./mar. 2007.

MODELAGEM IDEAL. Modelagem técnica. Disponível em: <<http://www.modelagemideal.com.br/>>. Acesso em 15 de abril de 2012.

MONTESANO, F.; PARENTE, A.; SANTAMARIA, P. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions. *Scientia Horticulturae*, [online], Elsevier, Amsterdam, NL v. 124, n. 3, p. 338-344, abr. 2010.

NEMALI, K.S. e VAN IERSEL, M.W. An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants. *Scientia Horticulture* [online], Elsevier, Amsterdam, NL p. 292–297, jul. 2006.

NGMA – NATIONAL GREENHOUSE MANUFACTURERS ASSOCIATION. *Greenhouse Environment Control System Considerations*. Disponível em: <[http://www.ngma.com/hhpdf/Enviro\\_Control2010.pdf](http://www.ngma.com/hhpdf/Enviro_Control2010.pdf)>. Acesso em 24 de junho de 2011.

NR17/ ERGONOMIA (117.000-7). Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde do Trabalhador. Editada pelo Ministério do Trabalho. Disponível em: <<http://www.ergonomia.com.br/html/normas.htm>>. Acesso em 5 de novembro de 2012.

OLIVEIRA, F. de A. de; MEDEIROS, J. F. de; LIMA, C. J. G. S. de; DUTRA, I.; OLIVEIRA, M. K. T. de. Eficiência agrônômica da fertirrigação nitrogenada e potássica na cultura do meloeiro nas condições do semiárido nordestino. *Revista caatinga*, Mossoró, RN, v. 21, n. 5, p. 5-11, dez. 2008.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H. *Projeto na engenharia*. Tradução WERNER, H.A., revisão NASCIMENTO, N. São Paulo, SP Edgard Blücher, v. 6, 2005 p. 1-6.

PINTO, J. R.; CHANDLER, R. A.; DUMROESE, R. K. Growth, Nitrogen Use Efficiency, and Leachate Comparison of Subirrigated and Overhead Irrigated Pale Purple Coneflower Seedlings. *Hortscience*, ASHS, Alexandria, VA, EUA, v. 43, n. 3, p. 897-901, jun. 2008.

PINTO, P. R., MARTINS, J. H., OLIVEIRA, R. A., MONTEIRO, P. M. B. Desenvolvimento de sensor de nível capacitivo para o uso no irrigâmetro. *Engenharia na agricultura*, Viçosa, MG, v. 19, n. 4. p. 329-333, jul./ago. 2011.

RIBEIRO, M.D.; TESTEZLAF, R.; FERRAREZI, R.S.; DEUS, F.P. Eficiência de um sistema de subirrigação na produção de mudas clonais de eucalipto. In: X CONGRESSO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA E XLI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA CLIA/CONBEA 2012. *Anais*, Londrina, PR, jul. 2012.

RICHARD, S., Y. ZHENG, AND M. DIXON. To recycle or not to recycle? *Greenhouse Canada*, 2002. Disponível em: <<http://www.greenhousecanada.com/content/view/926/38/>>. Acesso em 7 de Janeiro de 2013.

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* [online], Elsevier, Amsterdam, NL, v. 82, n. 1-2, p. 99–117, abr. 2006.

SALVADOR, C. A. *Sistema de irrigação por capilaridade na produção de porta-enxertos de mudas cítricas na fase de sementeira*. 2010, 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2010.

SANTOS, R., MARTINS, J.G. *Material de construção: Plásticos*. 2º Ed. 2010. Disponível em: <[http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Materiais/MCI%20-%20Plasticos\\_2010.pdf](http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Materiais/MCI%20-%20Plasticos_2010.pdf)>. Acesso em 19 de março de 2012.

SCHÄFER, G. *Produção de porta-enxertos cítricos em recipientes e ambiente protegido no Rio Grande do Sul*. 2004, 129 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2004.

SCHMAL, J. L., DUMROESE, R. K., DAVIS, A. S., PINTO, J. R., JACOBS, D. F. Subirrigation for production of native plants in nurseries: concepts, current knowledge, and implementation. *Native Plants Journal*, Green Bay, WI, EUA v. 12, n. 2, p. 81–93, 2011.

SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. Tr. AGUIAR, J. B e AGUIAR, J.M. (1985). *Projeto de engenharia mecânica*. Trad. João Batista de Aguiar e Jose Manoel de Aguiar. Porto Alegre, RS, Bookman, 2005.

SILVA, F.C. e FALDINI, S.B. *Galvanização a quente: Processo por batelada*. Universidade Presbiteriana Mackenzie, Departamento de Engenharias de Materiais. Disponível em: <[www.mackenzie.br/fileadmin/.../EE/.../Galvanizacao\\_a\\_Quente.pdf](http://www.mackenzie.br/fileadmin/.../EE/.../Galvanizacao_a_Quente.pdf)>. Acesso em 20 de março de 2012.

SIMPLAST E AMIPLAST. Processos de moldagem. Disponível em <<http://www.simplast.com.br/plastico/processo-de-moldagem.php>>. Acesso em janeiro de 2013.

SITIO KOLIBRI. Orquídeas ornamentais, Holambra, SP. Disponível em: <[www.sitiokolibri.com.br](http://www.sitiokolibri.com.br)>. Acesso em 3 de Novembro de 2012.

SOUSA, A. E. C.; BEZERRA, F. M. L.; SOUSA, C. H. C.; SANTOS, F. S. S. Produtividade do meloeiro sob lâmina de irrigação e adubação potássica. *Engenharia Agrícola* [online], Jaboticabal, SP, v. 30, n. 2, p. 271-278, mar./abr. 2010.

SPEARS® U.S.A. Fittings engineered for golf course & turf applications. Disponível em: <http://www.spearsmfg.com/>. Acesso em 22 de janeiro de 2013.

STAAL PLAST. Products ebb and flow. Disponível em: [www.staal-plast.dk](http://www.staal-plast.dk). Acesso em 3 de novembro de 2012.

SURFER. Version 9.8.669. Surface mapping system, Copyright © 1993 – 2009, Golden Software, Inc. Dec 22 2009.

TANDRA SISTEMAS DE CONTROLE LTDA. Sistemas de automação. Disponível em <<http://tandrasc.no.comunidades.net/>>. Acesso em 22 de janeiro de 2013.

TEIXEIRA, P. T. L.; SCHAFER, G.; SOUZA, P. V. D.; TODESCHINI, A. Desenvolvimento vegetativo e acúmulo de massa seca com a adubação de porta-enxertos cítricos cultivados em tubetes. *Ciência Rural* [online], Santa Maria, RS, v. 40, n. 12, dez. 2010.

TERRA VIVA. Produção de tomates, Holambra, SP. Disponível em: <[www.terraviva.agr.br](http://www.terraviva.agr.br)>. Acesso em 3 de novembro de 2012.

TERUEL, B. J. Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis climáticas e fertigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 14, n. 3, p.2 37–245, mar. 2010.

THOMAS, P.A.; STEGELIN, F.E.; SEYMOUR, R.M.; PENNISI, B.V.. Irrigation and Technology Assessment. *Greenhouse\*A\*Syst*. University of Georgia Cooperative Extension. Boletim 1275, Publicado, em Fev. 2009, Revisado em Mar. 2009. Disponível em: <[http://www.caes.uga.edu/Publications/pubDetail.cfm?pk\\_id=7372&pg=np&ct=greenhouse&kt=&kid=&pid=>](http://www.caes.uga.edu/Publications/pubDetail.cfm?pk_id=7372&pg=np&ct=greenhouse&kt=&kid=&pid=>)>. Acesso em 24 de junho de 2011.

TROPCLIMA. Equipamentos e estufas agrícolas. Disponível em: <[www.tropclima.com.br](http://www.tropclima.com.br)>, Acesso em 3 de Novembro de 2012.

UVA, W. L.; WEILER, T.; MILLIGAN, R. A survey on planning and adoption of Zero Runoff Subirrigation systems in greenhouse operations. *HortScience*, ASHS, Alexandria, VA, EUA v.33, n.2, p. 193-196. 1998.

UVA, W.L.; WEILER, T.C.; MILLIGAN, R.A.; ALBRIGHT, L.D.; HAITH, D.A. Risk analysis of adopting Zero Runoff Subirrigation systems in greenhouse operations: a Monte Carlo simulation approach. *Agricultural and Resource Economics Review*, Newark, DE, EUA, v.29, n.2, p. 229-239. out. 2000.

VIVECITRUS. Organização Paulista de Viveiros de Mudas Cítricas. *Informativo*, Araraquara, SP, v. 11, n. 47, ago/set/out 2012.

YANIK, K. Smart Benching: Growers looking for labor savings should consider options in benching. *Greenhouse Grower*. ed.7, v.27, p.42-44, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.greenhousegrower.com/magazine/?storyid=2249>>. Acesso em 24 de junho de 2011.

ZANETTI, M.; FERNANDES, C.; CAZETTA, J.O.; CORÁ J.E.; MATTOS JUNIOR, D. Características físicas de substratos para a produção de mudas cítricas sob telado. *Laranja* [online], Cordeirópolis, SP, v. 24, n. 2, p. 519-530, 2003.

ZHENG, Y., CAYANAN, D. F., DIXON, M. Optimum Feeding Nutrient Solution Concentration for Greenhouse Potted Miniature Rose Production in a Recirculating Subirrigation System. *HortScience*, ASHS, Alexandria, VA, EUA, v. 45, n. 9, p. 1378-1383, set. 2010.

## ANEXOS

### Anexo I: Identificação e caracterização de sistemas de subirrigação.

**Tabela 13. Dados das empresas e dos respectivos equipamentos de subirrigação comercializados.**

Empresa	Material	País	Descrição	Comprimento	Altura	Largura (cm)
Atlas	Tela galvanizada	EUA	Bancada vazada para suportar potes de flores	Variável e mesas portátil com 366 cm	-	91,44
						121,92
Tava Systems	Metal expandido	EUA	Sistemas para cultivo em ambiente protegido automatizado		-	182,88
	Bancadas plásticas					
Stal e Plast	Poliestireno de alto impacto	Dinamarca	Sistema ebb/flow (mesas de subirrigação) Tipo 1	Variável de 250 a 620 cm	4,2 cm + 2 cm de profundidade do canal de dreno	Variável de 140 a 172 cm
			Sistema ebb/flow (mesas de subirrigação) Tipo 2	Variável de 250 a 620 cm	4,2 cm + 2 cm de profundidade do canal de dreno	Variável de 120 a 172 cm
Estufas Europa	Laterais em chapa galvanizada e alumínio, e fundo em chapa metálica ou policarbonato	Portugal	Mesas de subirrigação	Múltiplos de 200 cm	-	Variável de 120 a 160 cm
Florida estufas agrícolas		Brasil	Bancadas vazadas	Variável	-	Padrão 120 cm
Soluciones Agrícolas 3000	Malha de aço galvanizado	Espanha	Mesas com malha, e mesa de subirrigação	Variável	12	120
	Placa de poliestireno rígido					150
Midwest GROMaster	Estrutura aço galvanizado e alumínio, e as bandejas de subirrigação de poliestireno rígido	EUA	Mesas com malha, e mesa de subirrigação.	Variável e fixa de 620 cm	-	180
						200
TropClima	Alumínio	Brasil	Bancadas e mesas sob pedido do cliente	Variável	-	Variável de 76,2 a 198,12

**Tabela 14. Relação das empresas visitadas, localização e sistema utilizado.**

<b>Empresa visitada</b>	<b>Pais</b>	<b>Especialidade</b>	<b>Sistema</b>
James Greenhouses	EUA	Flores ornamentais	Mesas de subirrigação
International Paper	Multinacional	Mudas de eucalipto	Mesas de subirrigação
Geraldo Barentse	Brasil	Plantas ornamentais	Manta capilar
Terra Viva	Brasil	Tomates de mesa e flores	Mesas de subirrigação
Sítio Kilibri	Brasil	Orquídeas	Manta capilar e aspersão
Tropclima	Brasil	Estufas e equipamentos agrícolas	Mesas de subirrigação e bancadas
Deg - Ufla	Brasil	Módulo experimental de subirrigação	Mesa de subirrigação

**Tabela 15. Dimensões das bandejas dos principais fabricantes para produção de mudas**

<b>BANDEJAS COM TUBETES</b>					
<b>EMPRESA</b>	<b>BANDEJA (células)</b>	<b>APLICAÇÃO</b>	<b>ALTURA (mm)</b>	<b>LARGURA (mm)</b>	<b>COMPRIMENTO (mm)</b>
<b>JKS</b>	162	Mudas de grande porte,	74	337	670
	162	hortaliças,	53	337	672
	200	aromáticas,	43	333	664
	242	fitoterápicas,	53	330	660
	288	frutíferas,	42	335	667
	288	gramíneas,	44	334	667
	396	nativas,	54	230	675
	450	ornamentais, tabaco, porta-enxerto de citros	42	333	665
<b>Star Pack</b>	32		120	280	545
	50		100	280	545
	72		75	280	545
	98	Mudas em geral	58	280	545
	128		48	280	545
	200		40	280	545
	288		31	280	545
<b>UNINJET</b>	288	Hortaliças	45	328	663
<b>Project ambiental</b>	150		50	335	502
	200	Hortaliças	51	333	673
	288		46	348	679
	450		51	333	673
<b>DACKO</b>	140	Pinus e Eucalipto	165	435	630
	96	Nativas e café	165	435	630
<b>Nutriplan</b>	15		78	210	350
	15		65	270	390
	50		90	290	570
	98	Flores	55	280	570
	1		60	265	375
	30		90	290	350
	64		60	340	340

**Tabela 15.** Continuação.

<b>BANDEJAS PARA TUBETES</b>					
<b>JKS</b>	63	Café, frutíferas, palmeiras	19*	440	600
	96		162	426	616
	140		162	426	616
	187	Citros, Pinus e Eucalipto	162	426	616
<b>UNINJET</b>	228		17*	428	675
	176		27*	388	590
	108	Café, Nativas e Frutíferas	25*	423	598
	96		162	426	616
	54	Nativas e Cacau	17*	396	623
	48		30*	398	604
	54		26*	390	604
	92		28*	394	594
	96		28*	394	594
	104		29*	428	605
	108		29*	428	605
<b>Project Ambiental</b>	172	-	30*	392	598
	176		30*	392	598
	188		29*	416	575
	192		29*	416	575
	224		30*	420	695
	224		18*	420	680
	54/96/140/187		165	420	620
	216		*	436	685
	228		*	415	645
<b>DACKO</b>	176	Eucalipto E Pinus	*	380	545
	192		*	415	545
	187		165	435	630
	54	-	165	435	630
	48		30*	398	604
	54		18*	395	625
	63		28*	480	622
	108		30*	428	595
<b>ALUMINOX</b>	176		29*	390	594
	192		30*	428	600
	228		30*	420	695
	126/96		30*	370	600
	54/96/187/140		165	410	582

\* Bandejas planas sem pés para suporte

**Tabela 16. Dimensões dos vasos dos principais fabricantes para produção de mudas.**

VASOS				
EMPRESA	VOLUME (mL)	APLICAÇÃO	ALTURA (mm)	DIÂMETRO (mm)
SURA	3000	Plantas que exige superfície ao invés de profundidade	150	220
	5000		45	260
	160		50	70
	230		51	90
	300	Vaso de pequeno porte, leve e econômico	54	100
	900		55	120
	1300		60	140
	1900		65	160
	300	Vaso de pequeno porte, leve e econômico	65	110
	1100		70	140
	1400		75	145
	880		Orquídea	75
	1160	76,5		143
1400	78	152		
2110	80	180		
2250	80	175		
440	90	105		
850	90	130		
1240	90	146		
1120	Pote facetado/flores	90		150
1860		91		165
3230		92		195
4820		95		222
Art Vasos	55	Liso/flores		95
	140		98	74
	260		100	88
	430		101	107
	510		102	103
	400		103	108
	360		110	108
	560		110	120
	850		110	130
	740		110	130
	860		110	137
	1050		113	144
	1230		115	148
1150	115	145		
1950	118	170		
1790	120	190		

**Tabela 16.** Continuação.

	80		120	60
	150		121	70
	210		122	81
	460	Liso/flores	138	105
	430		140	107
	770		140	125
<b>Vaso Forte</b>	800		145	130
	700	cone/flores	145	130
	910		155	140
	1350		157	145
	1350		160	148
	1200	Liso/flores	160	146
	2300		162	174
	5000		175	245
	90		180	58
	415		188	102
<b>Nutriplan</b>	725	Flores	192	125
	1000		200	130
	1160		235	145

**Tabela 17.** Valores do ângulo de inclinação dos vasos dos principais fabricantes nacionais.

<b>Empresa</b>	<b>Diâmetro superior</b>	<b>Diâmetro inferior</b>	<b>Altura</b>	<b>Ângulo de inclinação</b>
	10,7	7,5	9,0	100,1
	5,5	3,8	4,5	100,7
	7,4	5,5	5,5	99,8
	8,8	6,5	6,5	100,0
	10,3	8,3	10,1	95,7
	10,8	7,1	7,7	103,6
	13,5	8,2	13,8	100,9
	14,3	9,5	14,0	99,7
<b>Art vaso</b>	15,2	10,3	16,2	98,6
	18,0	11,0	19,2	100,3
	17,5	11,3	18,8	99,4
	10,5	7,5	9,0	99,5
	13,0	9,3	11,2	99,4
	14,6	10,3	12,2	100,0
	15,0	10,5	11,0	101,6
	16,5	12,0	14,5	98,8
	19,5	14,5	16,0	98,9

**Tabela 17.** Continuação.

	6,0	4,2	5,1	100,0
	7,0	5,6	5,4	97,4
	8,3	6,3	6,7	98,5
	10,5	7,5	9,0	99,5
	10,7	10,3	7,5	91,5
	12,5	9,0	11,0	99,0
	13,0	9,3	9,5	101,0
<b>Vaso Forte</b>	13,0	9,0	14,0	98,1
	13,0	8,0	9,5	104,7
	14,0	9,7	10,3	101,8
	14,5	10,3	12,1	99,8
	14,8	11,0	12,0	99,0
	14,7	11,0	11,8	98,9
	14,6	10,3	11,3	100,8
	17,4	12,0	15,7	99,8
	18,9	14,8	18,5	96,3
<b>Nutriplan</b>	18,0	15,0	15,0	95,7
	12,0	10,0	20,0	92,9
	12,0	10,0	12,0	94,8
<b>RDK vasos para mudas</b>	17,5	15,0	15,0	94,8
	12,5	11,0	11,0	93,9
<b>Média de inclinação</b>				<b>98,8</b>

**Tabela 18.** Valores padronizados de largura e comprimento dos módulos de estufas produzidas no mercado nacional.

<b>Largura dos módulos (m)</b>	<b>Comprimento dos módulos (m), múltiplos de:</b>
5,0	4,0 e 3,0
5,2	3,0
5,5	4,0 e 3,0
6,0	4,0 e 3,0
6,4	3,0; 3,6; 4,0 e 4,5
7,0	3,0; 3,6; 4,0 e 4,5
8,0	3,0; 4,0 e 4,5
9,0	4,0
10,0	3,0

## Anexo II: Projeto da mesa de subirrigação

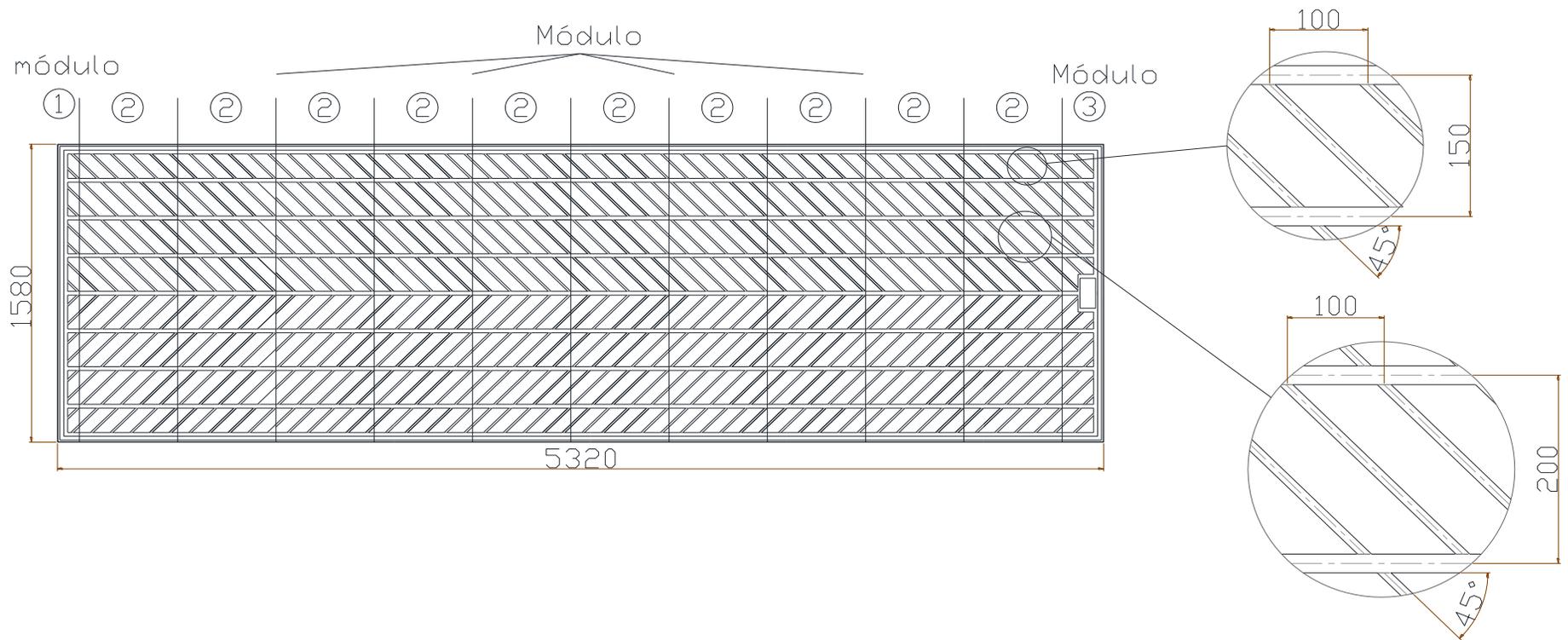
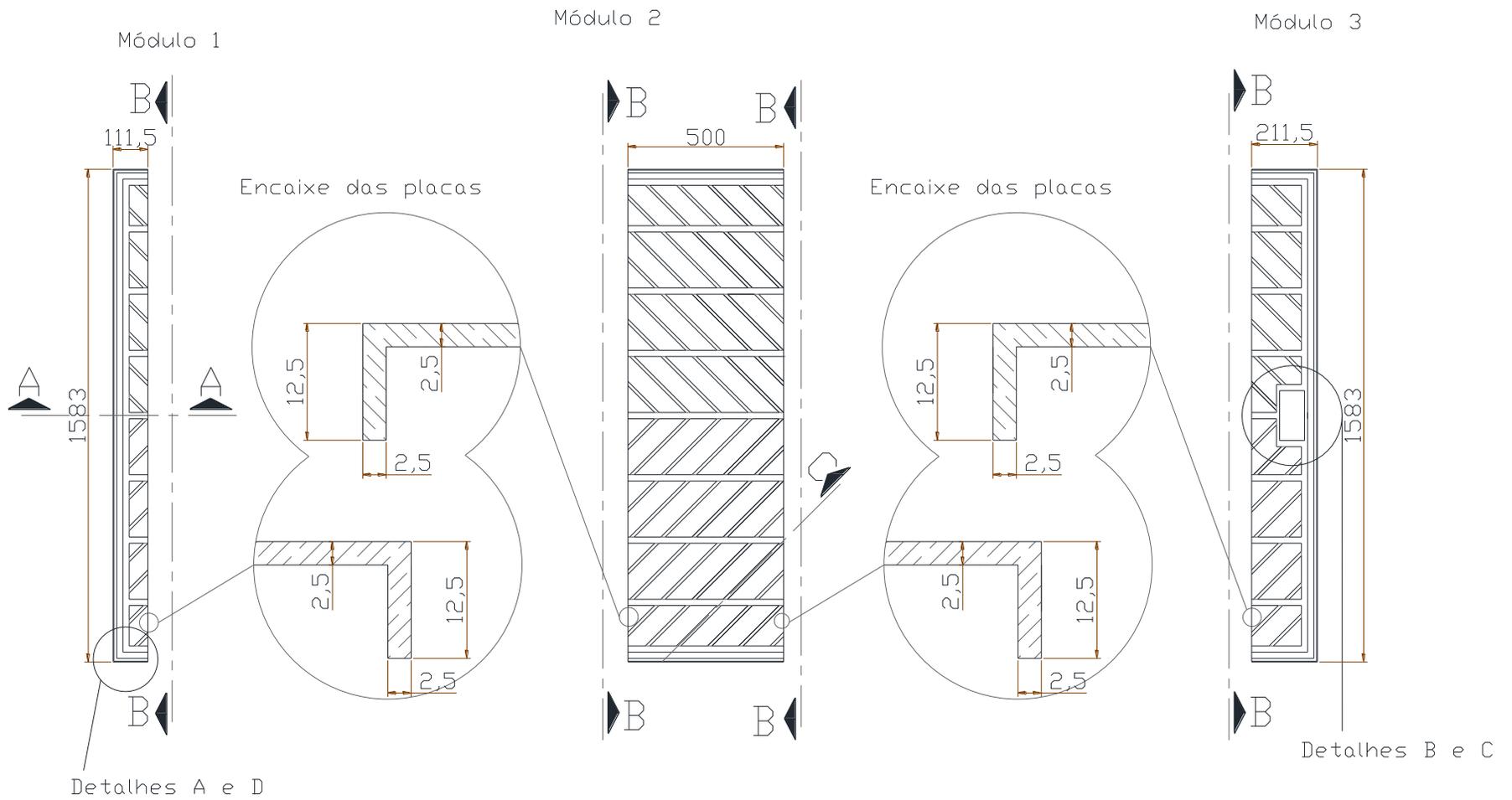
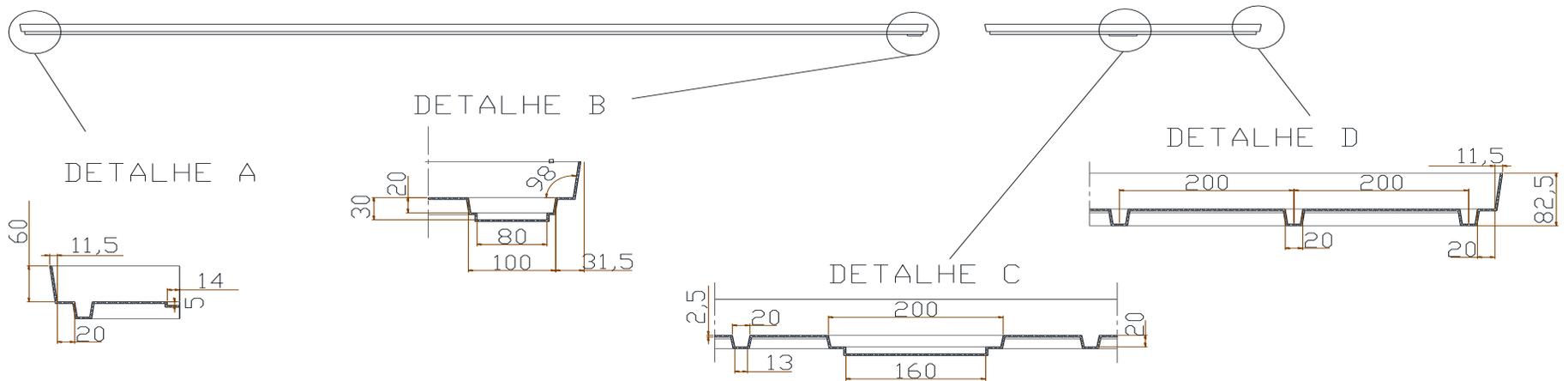


Figura 29. Vista superior da mesa de subirrigação e detalhes dos canais de drenagem.

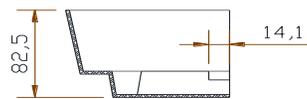


**Figura 30. Vista superior de cada módulo da mesa de subirrigação e detalhes de encaixe dos módulos.**

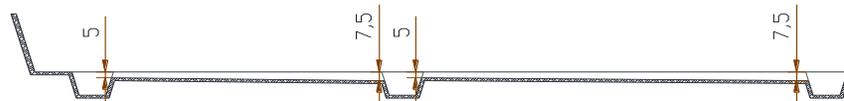


**Figura 31. Detalhes de projeto da mesa de subirrigação.**

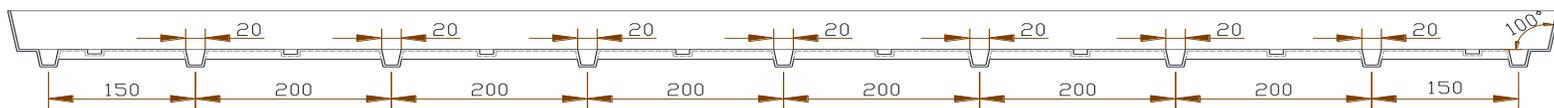
Corte AA



Corte CC-declividade



Corte BB



**Figura 32. Corte AA, corte BB e corte CC da do desenho técnico da mesa de subirrigação.**

**Anexo III: Dados experimentais da avaliação da mesa de subirrigação.**

**Tabela 19. Valores experimentais do tempo de adução e drenagem, leituras do hidrômetro, volume aduzido, altura média da lâmina, vazão de adução e de drenagem, na avaliação da mesa de subirrigação para as vazões e alturas de lâminas em estudo.**

Q (Lmin <sup>-1</sup> )	h Lâmina (cm)	T. Adução (min)	T. Dren. (min)	Hid. Antes (L)	Hid. Depois (L)	Vol. Aduz. (L)	h médio (cm)	Q adução (L min <sup>-1</sup> )	Q.Dren. (L min <sup>-1</sup> )	
10	1	00:10:32	00:06:00	12922,0	13027,0	105,0	1,03	9,97	15,17	
		00:09:44	00:05:30	13026,0	13123,0	97,0	0,98	9,97	14,33	
		00:09:43	00:06:00	13122,0	13218,0	96,0	1,00	9,88	14,33	
		<b>Média</b>	<b>00:10:00</b>	<b>00:05:50</b>	-	-	<b>99,3</b>	<b>1,00</b>	<b>9,94</b>	<b>14,61</b>
		<b>CV</b>	<b>0,047</b>	<b>0,091</b>	-	-	<b>0,050</b>	<b>0,025</b>	<b>0,005</b>	<b>0,033</b>
	3	00:32:05	00:17:00	7085,4	7406,0	320,6	3,51	9,99	17,53	
		00:29:35	00:17:00	7405,0	7738,0	333,0	3,50	11,26	17,53	
		00:31:42	00:17:00	7727,0	8042,0	315,0	3,51	9,94	17,35	
		<b>Média</b>	<b>00:31:07</b>	<b>00:17:00</b>	-	-	<b>322,9</b>	<b>3,51</b>	<b>10,40</b>	<b>17,47</b>
		<b>CV</b>	<b>0,043</b>	<b>0,000</b>	-	-	<b>0,029</b>	<b>0,002</b>	<b>0,072</b>	<b>0,006</b>
	5	00:52:00	00:26:30	8041,7	8543,0	501,3	5,61	9,64	17,17	
		00:51:52	00:27:00	8584,0	9085,0	501,0	5,65	9,66	17,11	
00:50:51		00:27:00	9510,0	10013,0	503,0	5,68	9,89	17,11		
	<b>Média</b>	<b>00:51:34</b>	<b>00:26:50</b>	-	-	<b>501,8</b>	<b>5,65</b>	<b>9,73</b>	<b>17,13</b>	
	<b>CV</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	-	-	<b>0,002</b>	<b>0,006</b>	<b>0,014</b>	<b>0,002</b>	
20	1	00:05:36	00:06:00	12455,5	12567,5	112,0	1,09	20,00	16,67	
		00:05:37	00:06:00	12670,0	12781,0	111,0	1,06	19,75	15,00	
		00:05:18	00:06:00	12780,0	12883,0	103,0	1,03	19,43	15,33	
		<b>Média</b>	<b>00:05:30</b>	<b>00:06:00</b>	-	-	<b>108,7</b>	<b>1,06</b>	<b>19,73</b>	<b>15,67</b>
		<b>CV</b>	<b>0,033</b>	<b>0,000</b>	-	-	<b>0,045</b>	<b>0,028</b>	<b>0,014</b>	<b>0,056</b>
	3	00:16:15	00:17:00	11503,5	11823,0	319,5	3,47	19,66	17,47	
		00:16:16	00:17:00	11821,0	12140,0	319,0	3,50	19,61	17,71	
		00:16:14	00:17:00	12138,5	12457,0	318,5	3,50	19,62	17,53	
		<b>Média</b>	<b>00:16:15</b>	<b>00:17:00</b>	-	-	<b>319,0</b>	<b>3,49</b>	<b>19,63</b>	<b>17,57</b>
		<b>CV</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	-	-	<b>0,002</b>	<b>0,005</b>	<b>0,001</b>	<b>0,007</b>
	5	00:25:02	00:27:00	10032,0	10537,5	505,5	5,67	20,20	17,17	
		00:25:10	00:27:30	10526,0	11019,0	493,0	5,72	19,59	17,33	
00:25:02		00:27:00	11016,0	11506,0	490,0	5,69	19,58	17,03		
	<b>Média</b>	<b>00:25:05</b>	<b>00:27:10</b>	-	-	<b>496,2</b>	<b>5,69</b>	<b>19,79</b>	<b>17,18</b>	
	<b>CV</b>	<b>0,003</b>	<b>0,011</b>	-	-	<b>0,017</b>	<b>0,004</b>	<b>0,018</b>	<b>0,009</b>	
30	1	00:03:56	00:06:00	13281,5	13390,0	108,5	1,05	27,61	15,50	
		00:03:40	00:05:30	13389,0	13489,0	100,0	1,00	27,25	15,00	
		00:03:41	00:05:30	13489,0	13590,0	101,0	1,03	27,45	14,67	
		<b>Média</b>	<b>00:03:46</b>	<b>00:05:40</b>	-	-	<b>103,2</b>	<b>1,03</b>	<b>27,43</b>	<b>15,06</b>
		<b>CV</b>	<b>0,039</b>	<b>0,051</b>	-	-	<b>0,045</b>	<b>0,025</b>	<b>0,007</b>	<b>0,028</b>
	3	00:11:42	00:17:00	13589,5	13908,0	318,5	3,50	27,22	17,65	
		00:11:31	00:17:00	13907,0	14219,0	312,0	3,46	27,08	17,41	
		00:11:23	00:16:30	14218,0	14526,5	308,5	3,43	27,11	17,41	
		<b>Média</b>	<b>00:11:32</b>	<b>00:16:50</b>	-	-	<b>313,0</b>	<b>3,46</b>	<b>27,14</b>	<b>17,49</b>
		<b>CV</b>	<b>0,014</b>	<b>0,017</b>	-	-	<b>0,016</b>	<b>0,010</b>	<b>0,003</b>	<b>0,008</b>
	5	00:18:40	00:26:30	14535,5	15045,0	509,5	5,64	27,29	17,89	
		00:18:27	00:26:30	15042,0	15540,0	498,0	5,61	26,99	17,72	
00:19:40		00:26:30	15540,0	16039,0	499,0	5,62	25,37	17,83		
	<b>Média</b>	<b>00:18:56</b>	<b>00:26:30</b>	-	-	<b>502,2</b>	<b>5,62</b>	<b>26,55</b>	<b>17,81</b>	
	<b>CV</b>	<b>0,034</b>	<b>0,000</b>	-	-	<b>0,013</b>	<b>0,003</b>	<b>0,039</b>	<b>0,005</b>	

