

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Modelo Computacional para Supervisão e Controle de
Casas de Vegetação**

EVANDRO GOMES LARANJEIRA

CAMPINAS - SP
ABRIL DE 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Modelo Computacional para Supervisão e Controle de
Casas de Vegetação**

Dissertação de mestrado submetida à banca examinadora para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração de Construções Rurais e Ambiência.

EVANDRO GOMES LARANJEIRA
ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ ANTONIO ROSSI

CAMPINAS - SP
ABRIL DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L32m Laranjeira, Evandro Gomes
Modelo computacional para supervisão e controle de
casas de vegetação / Evandro Gomes Laranjeira. --
Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Luiz Antonio Rossi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Estufas. 2. Software - Desenvolvimento. 3.
Lógica difusa. 4. Agricultura consumo de energia. 5.
Aclimação. I. Rossi, Luiz Antonio. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Titulo em Inglês: Greenhouse supervision and control computing model.
Palavras-chave em Inglês: Greenhouses, Software – Development, Fuzzy
Logic, Agriculture energy consumption e
Environment control.

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Paulo Ademar Martins Leal, Jose Eduardo Pitelli Turco e
Nelson Luis Cappelli

Data da defesa: 05/04/2005

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização deste projeto.

E muitos destes serão feitos pessoalmente.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE EQUAÇÕES.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
I - RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
II – INTRODUÇÃO.....	1
III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 – Casas de Vegetação.....	3
3.1.1 – Histórico.....	3
3.1.2 – Características Físicas.....	5
3.1.3 – Radiação Solar.....	6
3.1.4 – Temperatura.....	7
3.1.5 – Umidade do Ar.....	8
3.1.6 – Fluxo de Ar.....	8
3.1.7 – Instrumentação e Monitoração.....	9
3.1.8 – Controles.....	13
3.2 – Teoria “ <i>Fuzzy</i> ”.....	17
3.2.1 – Fundamentos.....	17
3.2.2 – Controladores “ <i>Fuzzy</i> ”.....	24
3.2.3 – Aplicabilidade.....	26
IV – MATERIAL.....	30
4.1 – Local.....	30
4.1.1 – Estrutura A.....	30
4.1.1.1 – Equipamentos.....	32
4.1.1.2 – Controles.....	34
4.1.1.3 – Variáveis Elétricas.....	34
4.1.1.4 – Sensores e Sistema de Aquisição de Dados.....	35
4.1.1 – Estrutura B.....	37
4.1.1.1 – Equipamentos.....	38
4.1.1.2 – Controles.....	39
4.1.1.3 – Variáveis Elétricas.....	39
4.1.1.4 – Sensores e Sistema de Aquisição de Dados.....	39
4.2 – Período do Experimento.....	39
4.3 – Recursos Computacionais.....	40
V – MÉTODOS.....	41
5.1 – Variáveis Ambientais.....	41
5.2 – Balanço Energético.....	41
5.2.1 – Calor de Radiação.....	42
5.2.2 – Calor de Respiração.....	43
5.2.3 – Calor de Fotossíntese.....	43
5.2.4 – Calor de Radiação Perdido para o céu.....	44
5.2.5 – Calor de Condução.....	45
5.2.6 – Calor de Transferido para o solo.....	45

5.2.7 – Calor de Infiltração.....	46
5.3 – Cálculos Psicrométricos.....	47
5.3.1 – Calculo de pressão de vapor do ar saturado externo.....	47
5.3.2 – Calculo de pressão de vapor parcial do ar externo.....	48
5.3.3 – Calculo de pressão de vapor do ar saturado interno.....	48
5.3.4 – Calculo de pressão de vapor parcial do ar interno.....	49
5.3.5 – Calculo de pressão de vapor na superfície da folha.....	49
5.4 – Temperatura de Ponto de Orvalho.....	50
5.5 – Déficit de Pressão de vapor folha-ar.....	50
5.5.1 – Déficit de Pressão de vapor ar.....	52
5.5.2 – Déficit de Pressão da folha.....	52
5.6 – Complemento de Iluminação.....	53
5.7 – Modelo “ <i>Fuzzy</i> ”.....	55
5.7.1 – Determinação dos conjuntos “ <i>Fuzzy</i> ”.....	55
5.7.2 – Funções de Pertinência.....	61
5.7.3 – Base de Conhecimento.....	63
5.7.3.1 – Base de Regras.....	64
VI – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
6.1 - Estrutura A.....	68
6.1.1 - Temperatura e Umidade.....	68
6.1.2 – Controle.....	71
6.2 - Estrutura B.....	74
6.2.1 - Temperatura e Umidade.....	74
6.2.2 - Radiação Solar.....	78
6.2.3 - Controle.....	80
VII – CONCLUSÃO.....	86
VIII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um termopar.....	10
Figura 2 - Anemômetro de pás.....	13
Figura 3 - Funções de pertinência a, b, c.....	22
Figura 4 - variável lingüística temperatura.....	23
Figura 5 – Configuração de um controlador “Fuzzy”.....	25
Figura 6 – Estrutura A - CEBEMEG/UNICAMP.....	31
Figura 7 – Forma e dimensões da Estrutura A.....	31
Figura 8 – Bomba de Irrigação – Estrutura A.....	32
Figura 9 – Conjunto de Iluminação Artificial.....	33
Figura 10 – Controles da Estrutura A.....	34
Figura 11– Analisador e medidor de energia multivariável - SAGA 4000.....	35
Figura 12 – Transmissor eletrônico de temperatura e umidade Novus.....	36
Figura 13 – Equipamento de Aquisição de Dados Field Logger.....	36
Figura 14 – Forma e dimensões da estrutura B.....	37
Figura 15 – Fontes de calor no interior de casas de vegetação.....	42
Figura 16 – Conjuntos “Fuzzy” para temperatura interna (Ti)	56
Figura 17 – Conjuntos “Fuzzy” para umidade relativa do ar interno.....	57
Figura 18 – Conjuntos “Fuzzy” para temperatura de solo (Tsolo).....	57
Figura 19 – Conjuntos “Fuzzy” para Déficit de Pressão de Vapor Folha-Ar (DPV).....	58
Figura 20 – Conjuntos “Fuzzy” para Rad_PAR.....	58
Figura 21 – Conjuntos “Fuzzy” para Diferença entre Ti-Tpo.....	59
Figura 22 – Disposição dos sensores – Estrutura A.....	68
Figura 23 – Gráfico de variação de Temperatura - Estrutura A.....	69
Figura 24 – Gráfico de variação de Umidade - Estrutura A.....	70
Figura 25 – Relação Umidade e Temperatura - Estrutura A.....	71
Figura 26 – Consumo de Iluminação – Estrutura A.....	73
Figura 27 – Tela de configuração para complemento de iluminação.....	73
Figura 28 – Disposição dos sensores estrutura B.....	75
Figura 29 – Gráfico de variação de temperatura.....	76
Figura 30 – Gráfico de variação de umidade.....	77
Figura 31 – Gráfico de variação de radiação solar.....	79

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Calor de radiação.....	42
Equação 2 - Calor de respiração.....	43
Equação 3 - Calor de fotossíntese.....	43
Equação 4 - Calor de radiação perdido para o céu.....	44
Equação 5 - Calor de condução.....	45
Equação 6 - Calor transferido para o solo.....	46
Equação 7 - Calor de infiltração.....	46
Equação 8 - Cálculo de pressão de vapor do ar saturado externo.....	47
Equação 9 - Cálculo de pressão de vapor atual (parcial) do ar externo.....	48
Equação 10 - Cálculo de pressão de vapor do ar saturado interno.....	48
Equação 11 - Cálculo de pressão de vapor atual (parcial) do ar interno.....	49
Equação 12 - Cálculo de pressão de vapor do ar na superfície da folha.....	49
Equação 13 - Cálculo de Temperatura de Ponto de Orvalho.....	50
Equação 14 - Cálculo de Temperatura de Ponto de Orvalho.....	50
Equação 15 - Déficit de pressão de vapor folha-ar.....	51
Equação 16 - Déficit de pressão de vapor do ar.....	52
Equação 17 - Cálculo do Ângulo Horário do Nascer do Sol.....	54
Equação 18 - Cálculo de Declinação Solar.....	54
Equação 19 - Cálculo de Fotoperíodo.....	55
Equação 20 - Funções triangulares de pertinência para T_i , U_{Ri} , T_{solo} e $T_i - T_{po}$	62
Equação 21 - Funções de pertinência trapezoidal para DPV, Rad PAR.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de Flores Ornamentais Comercializadas.....	4
Tabela 2 - Produtividade e Rendimentos de Atividades Agrícolas.....	5
Tabela 3 – Motor da Bomba de Irrigação - Estrutura A.....	32
Tabela 4 – Especificações de Iluminação Artificial - Estrutura A.....	33
Tabela 5 – Nomeclatura e Símbolos para os conjuntos “Fuzzy” Ti e Uri.....	60
Tabela 6 – Nomeclatura e Símbolos para os conjuntos “Fuzzy” Rad PAR, Tsolo e DPV.....	60
Tabela 7 – Nomeclatura e Símbolos para os conjuntos “Fuzzy” Ti_Tpo.....	61
Tabela 8 – Recomendações de iluminação adicional – Estrutura A.....	72
Tabela 9 – Condições climáticas.....	80
Tabela 10 – Avaliação dos dados de temperatura (dia 1).....	81
Tabela 11 – Avaliação dos dados de temperatura (dia 1).....	81
Tabela 12 – Valores padrão utilizados.....	83
Tabela 13 – Análise de clima e ações de controle–modelo computacional (dia 1)..	83
Tabela 14 – Análise de clima e ações de controle–existentes simples (dia 1).....	83

I - RESUMO

Cultivo protegido é uma tecnologia conhecida há muito tempo e seu propósito original era assegurar a sobrevivência das plantas durante os períodos de inverno e os meios de controle tornaram-se elementos essenciais. Atualmente no mercado, existem equipamentos capazes de controlar diversos fatores. A dificuldade reside em manipular todos estes elementos de uma forma precisa e racional, para alcançar o clima ideal na casa de vegetação, com um mínimo de gasto de recursos e insumos.

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo computacional para controle climático, desenvolvido em Lógica “*Fuzzy*”, utilizando equações de balanço energético e psicrometria para avaliação do clima.

Sua avaliação foi realizada comparando as ações de controle dos equipamentos existentes com as ações de controle sugeridas pelo modelo. Estas simulações foram feitas com dados climáticos obtidos em duas estruturas de produção e com níveis tecnológicos diferentes.

Palavras-chave: Estufas, Software - Desenvolvimento, Lógica difusa, Agricultura consumo de energia , Aclimação.

ABSTRACT

Since a long time protected culture is a well-known technology and its main objective is to assure the survival of the plants during the wintertime and the control ways become essential element. Nowadays there are several equipments in the market able to control many factors. Difficulties are related to the manipulation of all these elements in an adequate way to reach the optimum climate conditions with a minimum resource and input expenses.

In this project it was developed an computing model to environment control, developed in fuzzy logic, using thermal loading calculation and psicrometrics to environment analysis.

Its evaluation has been made comparing the existing equipment control actions with control actions suggested by computer model. This simulations has been made with environment data collected in two production structures with different technological levels.

Keywords: Greenhouses, Software – Development, Agriculture energy consumption, Environment control.

II - INTRODUÇÃO

O anseio dos agricultores de cultivar em ambientes protegidos vem desde o século passado. A necessidade de se produzir mais, mesmo durante os períodos climáticos favoráveis, fez com que se procurassem meios de abrigar as plantas dos danos provocados pelas intempéries. Ao longo do tempo foram surgindo novos tipos e modelos destas instalações, de acordo com as particularidades de cada região.

Entre as culturas cultivadas em ambiente protegido, no Brasil, destaca-se a floricultura como a atividade que tem mais investido em tecnologia de produção, devido principalmente ao alto valor econômico que estes produtos atingem e do elevado nível de exigência do mercado consumidor.

Nas regiões sul e sudeste, principalmente no Estado de São Paulo, têm ocorrido grande interesse de produtores em busca de novas tecnologias para o cultivo em ambiente protegido por se mostrarem vantajosas, possibilitando o aumento da produtividade, melhor qualidade dos produtos, produção fora de épocas convencionais e melhor preço no mercado.

Um dos fatores preponderantes no sucesso do cultivo protegido é o desenvolvimento de tecnologias dos sistemas de supervisão e controle na automação agrícola.

Tem-se a disposição no mercado computadores com grande capacidade de processamento, enorme gama de ferramentas computacionais e metodologias de desenvolvimento de *softwares* que possibilitam desenvolver controles próximos do ideal para ambientes protegidos. No entanto, quando uma ou mais variáveis estão envolvidas, recursos computacionais (algoritmos lineares) simples são extensos e difíceis de proporcionarem, verdadeiramente, um controle ideal.

O que se observa é que a maioria das tecnologias disponíveis no mercado, e adotadas, é uma adequação de soluções industriais para resolver questões individuais, não

abrangendo toda a gama de situações envolvidas no processo de cultivo protegido. Daí a necessidade de se buscar soluções próprias para o processo produtivo deste setor. Além disto, há grande dificuldade em proporcionar integração efetiva entre os equipamentos e o controle, a fim de empregá-los de forma eficiente e econômica. Esta dificuldade pode ser contornada, utilizando-se técnicas específicas para um sistema especializado, no caso, a Lógica “*Fuzzy*” ou Nebulosa, que vem sendo aplicada nos mais diversos campos de estudo, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologia elétrica, eletrônica e computacional. Segundo Cruz (2001) esses conceitos têm contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de áreas como lingüística, teoria de controle, teoria de informação, modelos de reconhecimento, análise de informação, entre outras.

Um importante aspecto a ser destacado é o consumo de energia elétrica, pois, dependendo das condições internas, equipamentos, tais como, ventiladores, exaustores e nebulizadores passam a funcionar com maior frequência, consumindo maior quantidade de energia elétrica. Esta energia é utilizada nas casas de vegetação principalmente para a manutenção do conforto térmico e tem extrema importância dentro da quantificação de custos, com total atenção aos equipamentos que estão sendo utilizados e a sua relação benefício/custo, no que diz respeito ao consumo.

Diante do exposto o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de um modelo computacional para supervisão e controle de casas de vegetação, com estrutura simplificada e execução de procedimentos padronizados utilizando a Lógica “*Fuzzy*”. Diferencialmente de outros controles já desenvolvidos, levou em consideração parâmetros relativos ao estado da planta no presente momento.

III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Casas de Vegetação

3.1.1 - Histórico

Segundo Bliska e Honório (2000), o primeiro registro que se tem conhecimento do cultivo de uma planta em condições protegidas é a de Martialis, 93 a.C. Um pouco mais tarde em 77 a.C, também foram descritos os esforços conduzidos na obtenção de pepinos cultivados em vasos com rodas para o Imperador Tiberius.

Somente muitos séculos depois a técnica de proteger as culturas foi sendo desenvolvida em diversas regiões, principalmente nos locais de clima frio. Assim é que os ingleses, a partir do plantio de uvas nas paredes da face sul de suas casas, procuravam tornar as condições de cultivo mais semelhantes às daquelas do sul da Europa. Em seguida, temos as “orangeries” francesas presentes nos castelos da realeza pra suprir as mesas da corte de laranjas fora de época.

Várias estruturas foram sendo testadas e utilizadas: adegas, celeiros e até buracos no solo recobertos por madeiras e galhos secos. O suprimento de calor era obtido a partir de fornalhas das residências ou da fermentação do esterco.

No século XVII, em Heindelberg, Alemanha, surgiu a estrutura primitiva que daria origem às atuais estufas, onde Salomans de Grans cultivava 400 laranjeiras. Nos EUA, a primeira estufa data de 1.800, noventa anos depois, seriam mais 4.600, recobrimdo uma área de 1.164ha. Atualmente as maiores áreas de cultivo protegido encontram-se na China, Japão, Espanha e Itália. Holanda e Bélgica destacam-se pela alta tecnologia e sofisticação de suas instalações.

Gradativamente o uso do cultivo protegido difundiu-se das regiões de clima frio passando pelas regiões tropicais e chegando às desérticas. Ou seja, podem funcionar como abrigos aquecidos, oásis ou guarda-chuva para as plantas.

No Brasil, as primeiras casas de vegetação com cobertura de vidro foram construídas nos institutos de pesquisa (IAC 1889) e escolas de agronomia (ESALQ 1903).

Na década de 60, surgiram entre os produtores de origem nipônica e na Cooperativa Agropecuária de Holambra para a aplicação comercial. Projetos pioneiros, como o do Instituto Adventista Agroindustrial de Manaus na década de 70 e São Tomé do Sul em 80, impulsionaram o cultivo protegido no país.

De acordo com Guiselini (2002), em 1995 havia 897 ha de área dedicada ao cultivo protegido, movimentando cerca de 1 bilhão de reais ao ano e com uma taxa de crescimento anual de 20%, podendo ser considerada uma das maiores de toda a economia brasileira, com grande parte dedicada à exportação. A tabela 1 abaixo mostra a evolução das espécies mais comercializadas no período de 1997 a 1999.

Tabela 1- Quantidade de flores ornamentais comercializadas no período de 1997 a 1999

	1997	1998	1999
Rosa	27.700.000	29.200.000	32.400.000
Crisantemo	11.000.000	11.000.000	13.000.000
Gérbera	460.000	460.000	460.000

(Fonte: Guiselini 2002)

As técnicas de utilização têm sido constantemente melhoradas e até hoje é possível obter resultados altamente significativos, com excelentes ganhos para os agricultores e elevado grau de produtividade. A evolução das técnicas propicia colheitas nas entressafas e

obtenção de produtos com melhor aspecto e qualidade. Na tabela 2, é possível visualizar os diferentes rendimentos de cada atividade com as atividades de cultivo protegido.

Tabela 2 - Produtividade e Rendimentos de Atividades Agrícolas

Produto	Produtividade (ton/ha/ano)	Rendimento Bruto (US\$/ha/ano)
A – Frutas		
Abacate	10	3.000
Abacaxi	40	6.000
Acerola	20	10.000
Banana	40	12.500
Goiaba	20	10.000
Graviola	10	9.500
Limão	20	13.500
Manga	20	12.000
Maracujá	12	9.000
Melão (2 safras)	50	11.000
Papaya	25	12.000
Tangerina	20	6.000
Uva (2 safras)	40	30.000
B - Grãos /Cereais		
Arroz	4	300
Feijão (2 safras)	2,4	1.600
Milho (2 safras)	6,0	660
Soja	2,5	400
Trigo	2,0	300
C – Hortaliças		
Alface	-	80.000 a 240.000ha/ Ano
D - Flores/ Plantas Ornamentais		
Rosas	-	96.000
Crisântemos	-	120.000
Violetas Africanas	-	504.000

(Fonte: Bliska e Honório, 2000)

3.1.2 – Características Físicas

As casas de vegetação são construções utilizadas com o intuito de aproveitar melhor as condições climáticas em benefício do crescimento e desenvolvimento das plantas em épocas em que as condições de clima não são adequadas para esta atividade, ou seja, estas

instalações propiciam a criação de um ambiente artificial que seja adequado ao cultivo de plantas.

O desenvolvimento das plantas no interior de casas de vegetação é mais acelerado, provocando um aumento no consumo de insumos. Assim, é necessário promover o seu fornecimento de maneira mais criteriosa, o que impõe um conhecimento mais profundo das necessidades de cada cultura, bem como do seu estágio de desenvolvimento (enraizamento, crescimento ou corte).

Angelocci (2002), Fontes (2003) e Guiselini (2002) ressaltam que as condições climáticas internas são fatores determinantes no desenvolvimento das plantas. Dentre os fatores climáticos mais importantes, destacam:

- Radiação solar
- Temperatura
- Umidade
- Fluxo de Ar

3.1.3 – Radiação Solar

A radiação solar é o principal elemento meteorológico, pois desencadeia todos os fenômenos meteorológicos, afetando todos os outros elementos como por exemplo: temperatura, pressão, vento, umidade e chuva.

A radiação de onda curta influencia o crescimento da planta em dois aspectos: primeiro, radiação fotossinteticamente ativa – PAR, (400 a 700nm), que é necessária para a fotossíntese; processo básico para o desenvolvimento da planta (Guiselini, 2002), e, segundo, o total de energia que é o principal fator que afeta a transpiração (Angelocci, 2002).

A luz natural fraca ou baixo período de iluminação (fotoperíodo) pode ser complementado com luz artificial. Esta é utilizada para estender o crescimento vegetativo por um período mais longo, adiantar ou retardar o tempo de florescimento, no caso do cultivo de flores.

O aumento da intensidade luminosa promove um aumento na atividade fotossintética, o que resulta em maior produção de hidratos de carbono e, desta forma, eleva o teor de matéria seca nos vegetais. Por outro lado, a falta de luminosidade provoca um maior alongamento celular, o que resulta em estiolamento (um aumento em altura e extensão da parte aérea), porém sem elevação no teor de matéria seca (Fontes 2003).

3.1.4 – Temperatura

Segundo Guiselini (2002), a temperatura do ar no interior de ambientes protegidos está intimamente ligada ao balanço de energia. Depende, portanto, dos processos de incidência de radiação solar, reflexão e re-irradiação através dos objetos no interior da estufa, convecção e condução através da cobertura, renovação do ar, evapotranspiração e troca de calor com o solo. A renovação de ar por meio de ventilação natural através da abertura de janelas e cortinas possibilita reduções significativas na temperatura no interior da estrutura.

A temperatura influi no desenvolvimento vegetativo, no florescimento, na frutificação, na formação das partes tuberosas ou bulbosas, bem como na produção de sementes.

Cada espécie botânica possui sua própria faixa de temperatura favorável à germinação, ao crescimento e outras atividades fisiológicas (Fontes 2003)

3.1.5 – Umidade do Ar

De acordo com Leal (2002), Guiselini (2002) e Angelocci (2002), os valores da umidade relativa do ar são inversamente proporcionais à temperatura do ar e muito variáveis no interior do ambiente protegido. Desta forma, com o aumento da temperatura, durante o período diurno, a umidade relativa diminui no interior da estrutura, tornando-se igual ou inferior a umidade observada externamente. Durante a noite, a umidade relativa aumenta bastante, freqüentemente próxima a 100%, devido à queda acentuada na temperatura verificada neste período e a retenção de vapor d'água pela cobertura.

A umidade em ambientes protegidos existe sob duas formas: vapor d'água e evapotranspiração. O vapor d'água é resultante do resfriamento, até atingir o ponto de orvalho. A formação do orvalho na superfície das folhas e na face interna da superfície da cobertura é bastante comum em estufas e propicia condições favoráveis a infecção por patógenos (Guiselini 2002).

O controle da umidade do ar exige a utilização de equipamentos especiais, por exemplo, pad-fan. O alto teor de umidade afeta substancialmente o estado fito-sanitário das plantas, especialmente com relação a ataques de fungos e bactérias patogênicas.

3.1.6 – Fluxo de Ar (Vento)

O vento aumenta a renovação de ar em torno da folha, aumentando a condutância aerodinâmica, resultando em valores de transpiração das plantas mais elevados. No interior da estrutura, quando ventilada, ocorre a retirada do ar úmido, entrando mais ar seco e menos quente, vindo do exterior do ambiente, o que também contribui para o aumento da evapotranspiração (Rocha 2002).

A variação da umidade do ar no interior da estrutura depende principalmente da temperatura do ar e da ventilação. Por sua vez, a temperatura do ar varia principalmente em função da densidade de fluxo de radiação solar incidente e da própria ventilação, a qual depende da área, tipo, localização e manejo da abertura e da velocidade de troca do ar do interior com o exterior (Guiselini 2002).

Há dois tipos de ventilação, a natural e a forçada. A natural depende basicamente do formato das instalações e das características climáticas regionais. A ventilação forçada ocorre através de exaustores ou ventiladores, devidamente dimensionados e posicionados nas estruturas de cultivo. (Leal 2002)

Os problemas relacionados com o vento no interior de ambientes protegidos estão quase sempre ligados a sua baixa velocidade. O que se busca até então, são meios de melhorar o seu aproveitamento, visando proporcionar uma renovação de ar mais eficiente nesses ambientes, a fim de diminuir a temperatura e a umidade excessiva.

3.1.7 - Instrumentação e Monitoração

Casas de vegetação e estufas, embora parecidas no que diz respeito à forma e estrutura, têm diferentes graus de controle do meio interno. Em casas de vegetação seu monitoramento e controle, para a produção vegetal, são práticas muito difundidas em todo o mundo e possibilitam auxiliar no manejo adequado da produção visando atingir faixas ótimas de cultivo, não somente para temperatura como também para outros parâmetros como umidade relativa, radiação solar (total, PAR e UV), nível de CO₂, sombreamento artificial e nutrição de plantas (Costa, 2001).

Ismail (1998) descreve os tipos de sensores mais comuns encontrados no mercado nacional e usados para monitorar o ambiente interno de casas de vegetação, dentre eles, pode-se destacar:

a) Termopares: constituem-se basicamente de junções de 2 fios expostas a temperaturas diferentes gerando uma força eletro-motriz (f.e.m.) térmica, princípio conhecido como Efeito Seebeck, que induz uma corrente elétrica. Correntes termoelétricas podem existir sempre que as junções de um circuito fechado formado, por pelo menos 2 fios diferentes, são colocados em diferentes temperaturas. Estes efeitos termoelétricos são resultados da movimentação de elétrons livres no metal. Em junções de metais diferentes ocorre um fluxo líquido de elétrons devido a diferenças na configuração destes nas camadas mais externas dos 2 metais. Um circuito termoelétrico básico consiste de 2 fios de metais diferentes, estendendo-se da junção de medida até a junção de referência, a qual é feita de fios de conexão de cobre e de um potenciômetro.

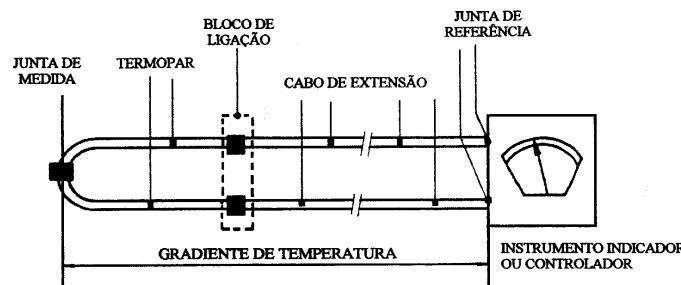


Figura 1 - Representação esquemática de um termopar
Fonte: Ismail (1998)

b) Termômetro de Máxima e de Mínima: Consiste em um tubo de vidro fino com fluído sensível ao calor, normalmente o mercúrio, que altera o seu volume, indicando as variações de temperatura. Possui um marcador, ou índice, para facilitar a leitura e registro dos dados.

c) Termômetro de Bulbo Seco e Bulbo Úmido ou Psicrômetro: Um psicrômetro de bulbos seco e úmido é constituído de um par de sensores de temperatura, sendo que o bulbo de um deles é coberto por um tecido molhado com água. Quando o bulbo úmido é colocado em uma corrente de ar, a água evapora do tecido, existindo uma temperatura de equilíbrio chamada temperatura de bulbo úmido. Este processo não é de saturação adiabática, que define a temperatura de bulbo úmido termodinâmico, mas é um de transferência de calor e massa simultâneos no bulbo úmido.

Para que o princípio no qual se baseia a operação deste tipo de medidor de umidade seja plenamente utilizado, é recomendável que o mesmo possua incorporado um pequeno ventilador para promover a aspiração do ar, a uma determinada velocidade, sobre os sensores úmido e seco.

d) Medidores por impedância elétrica (Capacitivos ou Resistivos)

O sensor utilizado neste tipo de medidor é fabricado a partir de um material higroscópico, cujas propriedades elétricas se alteram na medida em que o mesmo absorve ou libera moléculas de água. As mudanças na umidade são medidas em termos de alterações na capacitância ou resistência elétrica do sensor, ou mesmo na combinação das duas. A maioria dos sensores de impedância modernos utiliza a tecnologia de filmes finos. Os higrômetros elétricos são normalmente portáteis e compactos, sendo que a forma mais usual deste instrumento é composta de uma pequena sonda ligada por meio de um cabo, ou mesmo conectada diretamente ao corpo principal do medidor.

e) Piranômetros: medem a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies: uma pintada de preto e outra pintada de branco, igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo

da energia solar (Ultra-Violeta, Luz visível, Raios-Infravermelhos e Calor) na faixa de 300 a 3000nm.

f) Medidor de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR-Meter): Seu princípio físico é semelhante ao piranômetro, excetuando-se pelo fato de que o sensor de radiação PAR ou sensor de radiação fotossintética ativa é filtrado e calibrado para medir radiação solar na faixa de comprimentos de onda de 400 a 700 nanômetros (nm), os quais são efetivos na fotossíntese das plantas. Estes valores de radiação podem ser utilizados para se avaliar a adequada iluminação para o crescimento das plantas em áreas abertas, sombreadas ou internas sob luz artificial.

g) Luxímetro ou Medidor de Luz Visível: Semelhante à sensibilidade do olho humano na faixa de 400 a 700nm, Seu uso é difundido devido ao seu baixo custo. No entanto, seu emprego deve ser cauteloso. Precisão de 10.000 lux no inverno a 100.000lux no verão. Deve ser observado que a medição com o luxímetro varia em função da hora do dia, estação do ano, condições do tempo etc.

h) Medidor de CO₂: É um aparelho equipado com uma fonte de luz infravermelha que altera a pressão do componente gás carbônico presente no ar.

i) Anemômetro de pás rotativas: Estes instrumentos operam de um modo similar a uma turbina eólica e são constituídos de uma hélice montada dentro de uma carcaça cilíndrica. O escoamento de ar faz com que a hélice se movimente proporcionalmente à velocidade do fluido. Na realidade, é muito mais utilizado como um medidor de deslocamento de ar do que propriamente com um medidor de velocidade. Desse modo, a velocidade é obtida através de medição de uma determinada distância referente ao deslocamento de ar durante certo intervalo de tempo. Assim sendo, o valor resultante deve ser interpretado como uma velocidade média e não como uma velocidade instantânea do escoamento.

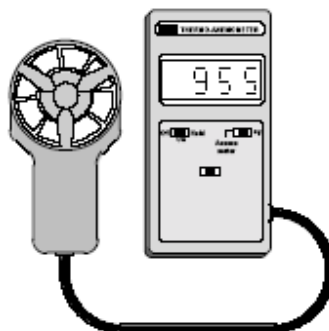


Figura 2 - Anemômetro de pás
Fonte: Ismail (1998)

Bliska e Honório (2000) advertem que para a colocação dos equipamentos dentro e fora da casa de vegetação, deve-se evitar o contato com estruturas da estufa e exposição direta ao sol. Os dados de medição internos devem corresponder às folhas do topo das plantas, no caso de hortaliças, e de 30 cm acima das culturas para flores.

3.1.8 – Controles

Segundo Fontes (2003), a palavra controle surgiu a partir da palavra de origem francesa “contrôler”, que denota o ato de fiscalizar, supervisionar e manter o equilíbrio. A necessidade de controlar processos deu origem às técnicas de controle.

Desde longa data, o homem sempre buscou simplificar seu trabalho de forma a substituir o esforço braçal por meio de outros mecanismos, de modo a obter uma melhoria da qualidade de vida. Com o decorrer da história, compreendeu-se que a criação de novos mecanismos, que poderiam substituir o processo produtivo artesanal, poderia ser a chave para o sucesso, o que possibilitaria o alcance de novos objetivos de forma rápida e econômica. Com esse novo paradigma e com promessa pautada na melhoria da qualidade de vida e liberação do ser humano da mão-de-obra braçal, é que, em meados do século XVIII, foram desenvolvidas

as primeiras máquinas que acabaram dando suporte tecnológico para a Primeira Revolução Industrial.

Esta Primeira Revolução Industrial, também conhecida como Revolução das Máquinas, ocorreu na Inglaterra, mais precisamente no período de 1760 a 1850, e foi marcada pela transição de um processo predominantemente agrícola de subsistência e da produção de bens de consumo para uma sociedade industrializada, caracterizada pela introdução de máquinas simples que realizavam um conjunto de processos repetitivos, substituindo a força muscular pela mecânica, que são realizados de modo a se atingir um nível de produtividade muito mais elevado. Para definir esta tarefa surgiu um termo que é utilizado até os dias de hoje, Automação, mas que só se consolidou durante a Segunda Revolução Industrial.

Conforme o mesmo autor, a Segunda Revolução Industrial se deu com o aperfeiçoamento e implantação de máquinas a vapor por toda a Europa no período de 1850 a 1900. O primeiro trabalho significativo utilizando técnicas de automação, desenvolvido neste período, foi o de James Watt, que construiu um controlador centrífugo do tipo pneumático e hidráulico para o controle de velocidade de uma máquina a vapor.

Não tardou muito até que se pudesse vislumbrar a possibilidade da utilização de controles em processo de cultivo protegido, a fim de reduzir a intervenção humana no processo e proporcionar uma maior produtividade e qualidade nos produtos cultivados.

Entre as décadas de 40 e 50, os sistemas de controle utilizados em casa de vegetação eram primitivos, consistindo somente de controladores com chaves liga-desliga, que controlavam somente fatores relacionados à temperatura (aquecimento e resfriamento), determinados por termostatos separados. Cada controle resultava em grandes diferenças de temperatura entre os pontos ligado e desligado (Hanan,1997).

Como resultado de desenvolvimentos realizados no período da Segunda Guerra Mundial, o uso de circuitos elétricos proporcionou o surgimento de controles que recebiam sinais externos do ambiente, através de sensores, e efetuavam automaticamente os cálculos necessários, enviando o sinal de saída para os atuadores mecânicos. Este sistema é chamado Controle Analógico, porque um sinal ambiental variando continuamente era sujeito a modificações para atualizar sinais de saída para um equipamento (Carr, citado por Hanan,1997).

O advento dos microcomputadores, na década de 70, e o desenvolvimento de circuitos digitais proporcionaram o surgimento de controles mais precisos, com capacidade de processar e armazenar um grande número de informações num curto espaço de tempo e a possibilidade de maior integração com equipamentos e sensores.

Challa, citado por Hanan (1997), define que a principal tarefa de um controlador climático reside em evitar extremos climáticos que possam causar dano à planta, tais como: sobre-aquecimento, principalmente causado por intensa radiação solar, e baixa temperatura durante a noite ou períodos de inverno.

De acordo com Albright (1990), projetar sistemas de controle climático para casas de vegetação requer entendimento das complexas interações entre os sistemas biológicos, contidos no espaço, e o ambiente gerado pelo controle. Isto tem como objetivo criar um balanço favorável, tanto para sistemas biológicos, como para sistemas físicos. Para gerar este balanço, são requeridos entendimentos de física, termodinâmica, matemática, através de cálculos, mecânica dos fluídos, transferência de calor, transferência de massa, psicrometria, refrigeração, fenômenos climáticos, teoria de controle e biologia ambiental.

Hanan (1997) delineou várias características necessárias para sistemas de controle climático, que dentre elas pode-se ressaltar:

- Estabilidade: O sistema deve estar apto a seguir corretamente um comando de entrada e não proporcionar extremos de temperatura em curto espaço de tempo, prejudicando o desenvolvimento da planta.

- Precisão: O sistema deve dispor de sensores suficientemente sensíveis a ponto de detectar qualquer variação que possa interferir na planta. E, principalmente, deve identificar o tempo entre o dado recebido, o processamento desta informação e a resposta obtida, dentro de padrões pré-estabelecidos no período de modelagem do sistema.

- Confiabilidade: O sistema deve ser otimizado a fim de eliminar ou, em alguns casos, reduzir as chances de falha, tais como perda de dados devido à falta de energia, acessos não autorizados ou panes em alguns dos dispositivos do conjunto de circuitos eletrônicos.

A efetividade do sistema de controle depende do tipo de controlador lógico (liga-desliga, proporcional, proporcional e integral ou proporcional, integral e derivativo), das capacidades dos sensores, atuadores mecânicos e das propriedades físicas do ambiente controlado (McCormack e Rummel, 1993).

3.2 - Teoria “Fuzzy”

3.2.1 - Fundamentos

Segundo Cruz (2001), na década de sessenta, mais precisamente em 1965, o professor Lotfi A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, que, na época, trabalhava com Inteligência Artificial, achava que a teoria usual de conjuntos era por demais rígida para contemplar fenômenos cotidianos do dia a dia. Uma vez que os sistemas especializados, que estava interessado implementar, eram softwares interativos, capazes de tomar algumas decisões próprias, e por serem sustentados pela teoria usual de conjuntos, a qual admite apenas decisões binárias, ou seja, o “verdadeiro” e o “falso”, não seria possível interpretá-los satisfatoriamente, abrangendo toda a gama de decisões da mente humana para interpretar estes fenômenos.

Foi então que, neste período, Zadeh sugeriu uma teoria alternativa de conjuntos, teoria esta muito mais flexível, para atender suas necessidades. Uma teoria onde a passagem da pertinência para a não pertinência fosse feita de uma forma lenta e gradual e não abrupta, como na teoria usual dos conjuntos. Dessa maneira, surgiram os Conjuntos “Fuzzy”; onde esta, pode ser traduzida por Nebulosa.

Com os estudos realizados sobre os conjuntos “Fuzzy”, surgia a possibilidade de interpretar os fenômenos não quantitativos e vagos. Porém, surgia também a necessidade de dar a esta teoria uma estrutura matemática completa e consistente. Como os sistemas lógicos estão intimamente relacionados com a maioria dos conjuntos, Zadeh vislumbrou a possibilidade da construção de uma lógica, capaz de adequar os conjuntos “Fuzzy” aos padrões dos sistemas lógicos já consagrados. A esse novo sistema, ele denominou de “Lógica “Fuzzy””.

Na lógica clássica, o valor verdade de uma proposição assumirá, somente, o valor falso (0) ou o valor verdadeiro (1) e, necessariamente, terá que assumir um desses dois, não havendo outra possibilidade. Já na Lógica “*Fuzzy*”, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto “*Fuzzy*” de qualquer conjunto parcialmente ordenado. Geralmente é adotado o intervalo fechado de números reais $[0,1]$. Assim, na Lógica “*Fuzzy*” não existem apenas o verdadeiro (1) e o falso (0), mas uma infinidade de valores verdades, os quais são expressões lingüísticas interpretadas como subconjuntos “*Fuzzy*” do intervalo unitário. Por exemplo: falso, muito falso, um pouco falso, mais ou menos falso, pouco verdadeiro, muito verdadeiro, verdadeiro etc.

Na lógica clássica, os predicados são termos exatos tais como: igual a, maior que, Ímpar, primo etc. na Lógica “*Fuzzy*”, os predicados são termos subjetivos ou “nebulosos”, como: magro, alto, úmido, quente, velho etc. Outro aspecto em que diferem as duas lógicas é quanto aos quantificadores universal (\forall) e o existencial (\exists). Na lógica “*Fuzzy*”, uma variedade de quantificadores, além do existencial e do universal, são usados freqüentemente, como: pouco, muito, muito pouco, perto de, vários, geralmente, em torno de, provavelmente etc. Dessa forma, pode-se ter uma pequena visão da flexibilidade da Lógica “*Fuzzy*”.

Conforme Cruz (1996) e Feitosa (1992), a idéia de Zadeh se torna interessante, na medida em que se associa a cada elemento de um conjunto um determinado número real do intervalo $[0,1]$. Cada conjunto corresponde a um predicado lógico e os elementos do conjunto aos objetos que satisfazem o predicado. Pode-se dizer que este número é o grau de verdade do objeto satisfazendo o predicado. Daí a definição de um conjunto “*Fuzzy*”.

Definição: Seja $V \neq \emptyset$. Um conjunto “Fuzzy” A é uma função $f_a: V \rightarrow [0,1]$, onde o conjunto V é chamado o universo de A , com $A \subseteq V \times [0,1]$.

Na definição anterior, $[0,1]$ é o intervalo de números reais e f_a é denominado o conjunto verdade de A . Dessa forma definido, pode-se identificar o conjunto “Fuzzy” A com a função f_a , ou seja, $A=f_a$.

Por exemplo: Seja $V=\{x_1,x_2,x_3,x_4\}$. Então um conjunto “Fuzzy” A poderia ser do tipo: $A=\{(x_1,0,3), (x_2,0,7),(x_4,0,1)\}$. É conveniente observar que, cada elemento do conjunto “Fuzzy” A possui um valor verdade em $[0,1]$ e que A é formado por pares ordenados, uma vez que $A \subseteq V \times [0,1]$. Assim, o valor verdade, também chamado de “grau de aderência” ou “grau de pertinência”, do elemento x_1 é 0,3, ou seja, $f_a(x_1)=0,3$. Por convenção, os elementos que tiverem grau de aderência (valor verdade) igual a zero não precisam se representados no conjunto, que é o caso do elemento x_3 ou seja, $f_a(x_3) = 0$, ou, ainda, $(x_3,0) \in A$. Também por convenção, todos os elementos do conjunto universo V possuem grau de aderência igual a 1, grau que não precisa se representado.

Outras definições da Lógica “Fuzzy” se fazem necessárias para melhor compreensão do que se segue.

Sejam V , o conjunto universo, e dois conjuntos “Fuzzy” $A=\{(x,f_a(x)), \forall x \in V\}$ e $B=\{(x,f_b(x)), \forall x \in V\}$. Então as regras são

- i) Igualdade de conjuntos: $A=B \Leftrightarrow f_a(x) = f_b(x), \forall x \in V$.
- ii) Conjunto Vazio: $A=\emptyset \Leftrightarrow f_a(x) = 0, \forall x \in V$.
- iii) Conjunto Universo: $A=V \Leftrightarrow f_a(x) = 1, \forall x \in V$.

- iv) União de Conjuntos: $A \cup B = \{(x, \max[f_a(x), f_b(x)]), \forall x \in v\}$. Utiliza-se a notação: $\max[f_a(x), f_b(x)] = f_a \vee f_b$, onde \vee é conectivo “ou”.
- v) Intersecção de conjuntos $A \cap B = \{(x, \min[f_a(x), f_b(x)]), \forall x \in v\}$. Utiliza-se a notação: $\min[f_a(x), f_b(x)] = f_a \wedge f_b$, onde \wedge é conectivo “e”.
- vi) Conjunto Complementar: denotado por $\neg A$: $f_{\neg a}(x) = 1 - f_a(x), \forall x \in v$, onde “ \neg ” é o conectivo “não”, ou seja, a negação.

É interessante notar que, para a linguagem “*Fuzzy*”, são usados os conectivos: \wedge (e), \vee (ou); \neg (negação), \rightarrow (se... então). O \wedge modelado pelo mínimo, o \vee pelo máximo, \neg pelo complementar, isto é negar uma frase A de valor lógico (grau de aderência) $f_a(x)$ é tomar o seu complementar $\neg A$, de valor lógico $f_{\neg a}(x) = 1 - f_a(x)$. Já o conectivo \rightarrow , chamado de implicação, é modelado por: $a \rightarrow b = 1 \wedge (1 - a + b)$. Dessa forma, uma sentença “*Fuzzy*” pode admitir outros valores verdades e não somente falsa (0) ou verdadeira (1).

Na lógica clássica, um elemento ou pertence a um conjunto ou não. Dado um conjunto universo U e um elemento $x \in U$, o grau de pertinência $f_a(x)$, o qual, de agora em diante, denota-se por $\mu_a(x)$, com respeito a um conjunto $A \subseteq U$, é dado pela função $\mu_a(x): U \rightarrow [0,1]$, chamada função característica, definida por:

$$\mu_a(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Zadeh (1987) propôs uma caracterização mais ampla, fazendo com que a passagem da pertinência para a não pertinência fosse mais lenta e gradual, na medida em que

sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor (0) indica uma completa exclusão e o valor (1) representa a completa pertinência ou inclusão. Por exemplo, para expressar a idéia de que a temperatura (θ) tem seu valor perto de 30°C, pode-se utilizar uma função de pertinência triangular ilustrada na figura 3, onde os valores maiores e menores que 30°C, para sugerir a idéia de quanto mais perto a temperatura de 30°C, mais ele se identifica com o conjunto representado.

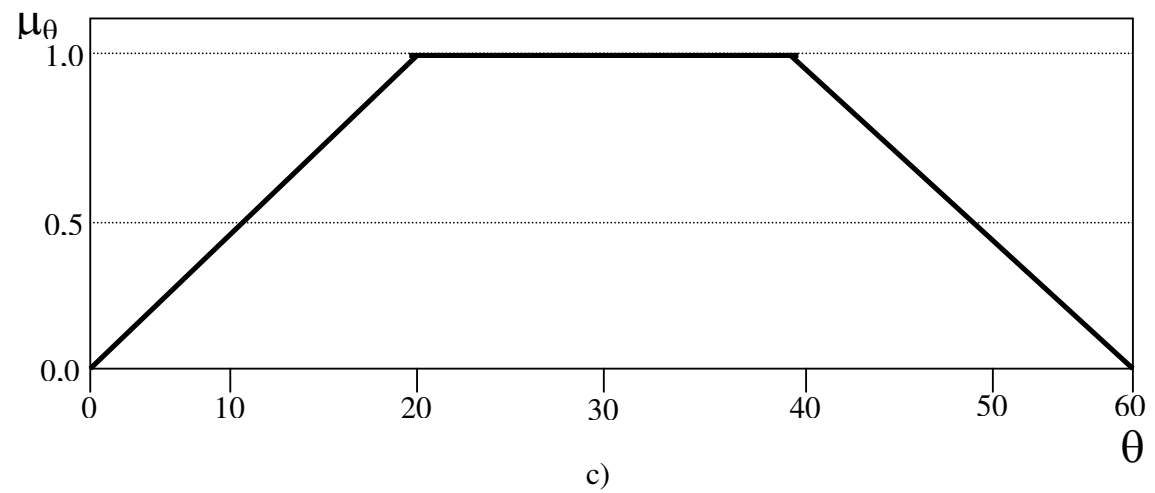
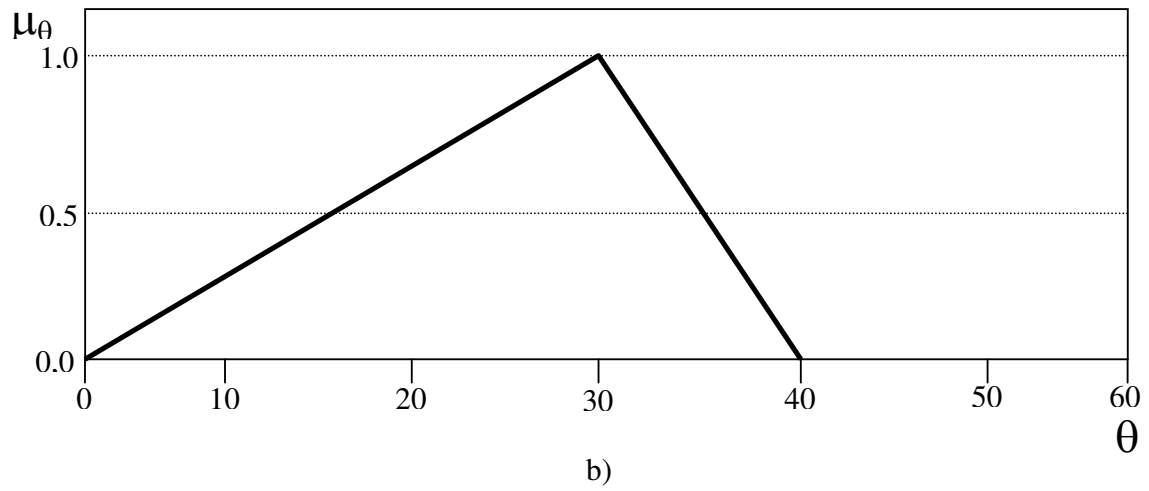
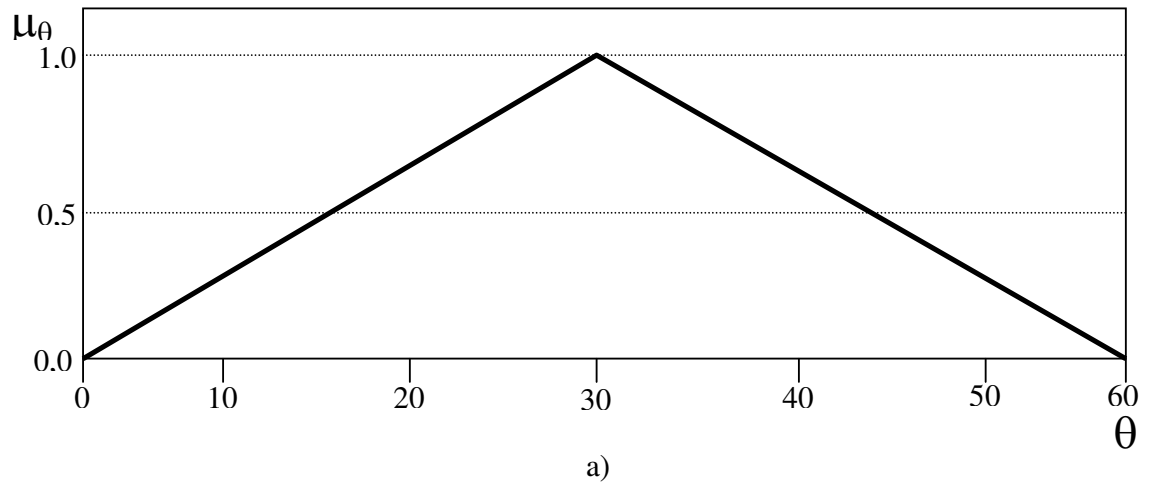


Figura 3 - Funções de pertinência a,b,c

Um outro fenômeno poderia ser caracterizado pela função trapezoidal ilustrada na figura 3 (b), a qual expressa a necessidade de qualquer temperatura entre 20°C e 40°C ter a mesma importância que a temperatura central de 30°C. Se a necessidade é fazer com que os valores menores de 30°C tenham pertinência maior dentro do conjunto e restringir este fato aos valores maiores, pode ser usada uma outra função triangular, ilustrada na figura 3(c) a qual vem ao encontro do que se deseja representar.

Conceitos são de uma forma geral, expressos por elementos quantitativos, como: “muito”, “não muito”, “mais ou menos”, “pouco quente”, “um tanto baixo”, ao invés de valores quantitativos. Esses elementos qualitativos são resgatados através de variáveis lingüísticas, as quais assumem valores dentro de um conjunto de termos lingüísticos, ou seja, palavras e frases ao invés de assumirem valores numéricos. Por exemplo, a variável lingüística “temperatura” poderia assumir valores no conjunto {mínima (MI), muito baixa (MB), pouco baixa (PB), média (MD), pouco alta (PA), muito alta (MA), máxima (M)}. Para se atribuir um significado em termos lingüísticos, associa-se a cada um deles um conjunto “Fuzzy” definido sobre um universo de discurso comum conforme a Figura 4.

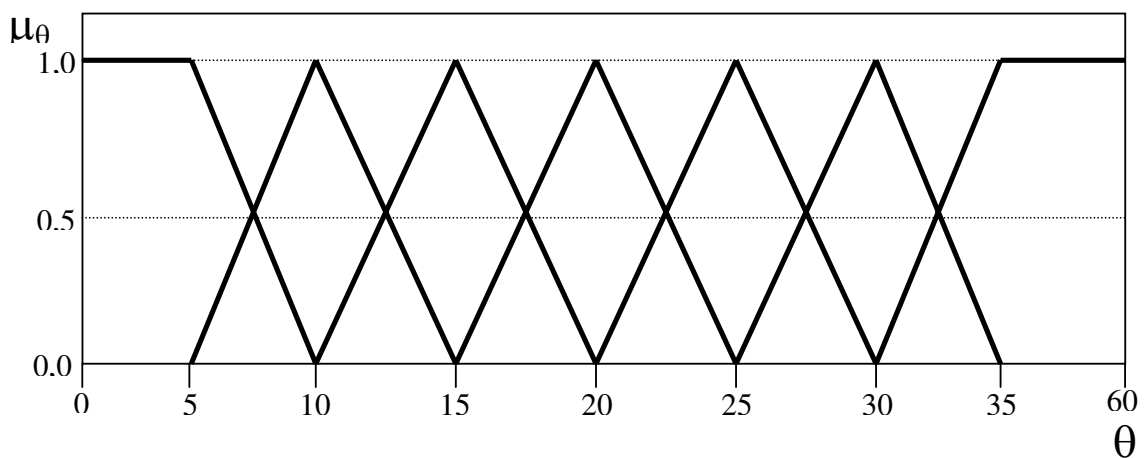


Figura 4 - variável lingüística temperatura

Dessa forma, pode-se observar que os conjuntos “*Fuzzy*” resgatam o significado das variáveis lingüísticas de maneira mais precisa, ou seja, são tratadas no nosso discurso cotidiano. Note-se, também, que os elementos de cada conjunto “*Fuzzy*” passam da pertinência para não pertinência de forma lenta e gradual, como sugeriu Zadeh(1987).

3.2.2 - Controladores “*Fuzzy*”

Segundo Azevedo (1999), desde que o controlador baseado em lógica nebulosa foi proposto por Mamdani (1974), citado pelo primeiro, muitos estudos têm sido realizados na aplicação desse tipo de controlador aos processos industriais tais como processos trocadores de calor, aquecedores de água e tantos outros citados na literatura.

Para a elaboração de um sistema de controle “*Fuzzy*” são utilizadas regras lingüísticas de controle, com a seguinte forma genérica:

RI: Se premissa, então conclusão (ou ação, no caso de controle).

O controlador “*Fuzzy*” (CF) consiste num conjunto de sentenças lingüísticas ou regras, as quais definem ações de controle individuais.

A configuração de um sistema lógico “*Fuzzy*” é mostrada na figura 5 abaixo. Seus principais componentes são: a Fuzzyficação, a base de conhecimentos, a máquina de inferência e a de Defuzzyficação.

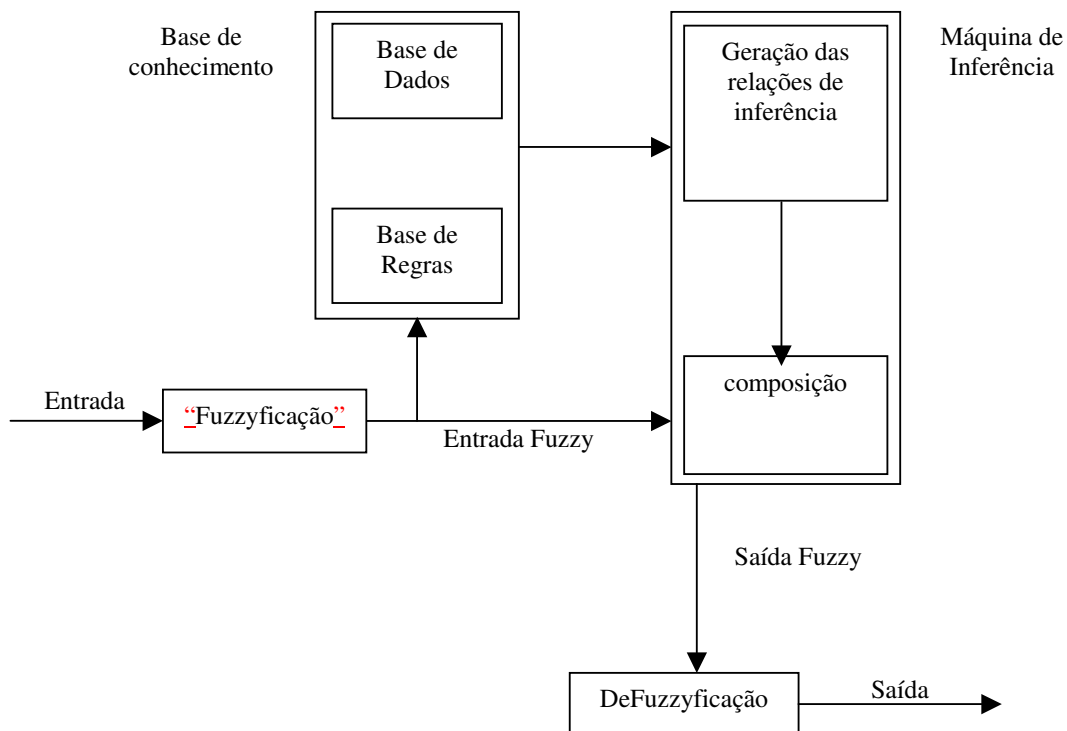


Figura 5 – Configuração de um controlador “Fuzzy”
 Fonte: Azevedo (1999)

O processo de “Fuzzyficação” envolve as seguintes funções:

- a) toma os valores numéricos (não “Fuzzy”) das variáveis de entrada,
- b) faz um mapeamento para condicionar os valores de entrada a universos normalizados e
- c) “Fuzzy”fica os valores, convertendo-os em conjuntos “Fuzzy”, de modo que possam se tornar instâncias de variáveis lingüísticas.

A Base de Conhecimento compreende a base de regras e a base de dados:

- a) a base de regras é formada por um conjunto de regras lingüísticas que definem a estratégia de controle do sistema.

- b) a base de dados é formada pelas definições dos conjuntos “*Fuzzy*” que descrevem os predicados de cada variável de entrada e saída com suas respectivas funções de pertinência, as quais podem ser discretas ou contínuas.

A máquina de inferência como núcleo do controlador “*Fuzzy*”:

- a) Infere ações de controle empregando implicações “*Fuzzy*” e as regras de inferência da lógica “*Fuzzy*” e
- b) Simula tomada de decisões baseadas nos conceitos “*Fuzzy*”.

O processo de “defuzzyficação” desempenha as seguintes funções:

- a) Efetua um levantamento, no qual compatibiliza os valores normalizados das variáveis de saída com os valores dos universos de discurso reais das variáveis,
- b) Transforma as ações de controle “*Fuzzy*” inferidas em ações de controle não-”*Fuzzy*”.

Sistemas que utilizam controladores baseados em regras “*Fuzzy*” podem possuir o mesmo esquema dos sistemas básicos de controle, sendo que o controle baseado em regras “*Fuzzy*” está em posição e função semelhantes ao de um controlador convencional.

3.2.3 - Aplicabilidade

Zadeh (1987) demonstra em seus trabalhos a capacidade de tal teoria interpretar os fenômenos não exatos do nosso dia-a-dia, resgatando-os matematicamente de uma forma mais simples e mais exata do que a teorias matemáticas usuais. Daí sua aplicabilidade. Apesar disso, os matemáticos não consideram a lógica “*Fuzzy*” como uma lógica matemática nos padrões atuais, ou seja, ela não é, ainda, uma teoria matemática perfeitamente consistente e completa, uma vez que ela deixa de satisfazer algumas propriedades da lógica clássica,

principal responsável para ditar a veracidade de uma teoria matemática. Isso, no entanto, não inviabiliza a teoria “*Fuzzy*” como teoria matemática perfeitamente aplicada, segundo Cruz (1996), citado por (Fontes 2003).

No decorrer dos anos, devido ao aperfeiçoamento e desenvolvimento da Lógica “*Fuzzy*”, significativos resultados foram aparecendo e despertando o interesse de outros campos de estudo, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologias elétricas, eletrônicas e computacionais. Esses conceitos “*Fuzzy*” têm contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de diversas áreas, onde tem surgido um grande número de máquinas capazes de tomar decisões, as quais são chamadas máquinas inteligentes.

Especialistas em programação, como Tanaka e Mizumoto (1974), citados por Cruz (2001), consideram a teoria “*Fuzzy*”, no que diz respeito aos modelos matemáticos, muito mais adequada a programação, sugerindo *softwares* “*Fuzzy*” de fácil entendimento, capazes de serem usados em várias simulações reais. Estas afirmações são confirmadas por Chang (1974), citado por Cruz (2001), que também trabalha com interpretação e execução de programas “*Fuzzy*”, os quais traduzem de maneira mais real as interpretações dos fenômenos cotidianos. De forma geral, os programas “*Fuzzy*” são de fácil execução e suas etapas são de fácil compreensão.

Segundo Bose (1996), citado por Cruz (2001), a aplicabilidade da lógica “*Fuzzy*” é comprovada em controle de processos, modelagem, estimação, identificação e diagnóstico. Controles “*Fuzzy*”, já desenvolvidos e utilizados em processos complexos, mostraram um desempenho superior a outros controles, como por exemplo: o Proporcional Integral Derivativo (PID). Este sucesso tem atraído muito campo de trabalho.

Como exemplo de aplicações “*Fuzzy*”, citam-se o experimento realizado por Odhiambo et al.(2001), que consiste de dois modelos “*Fuzzy*” para estimar taxas de

evapotranspiração, em ambientes áridos e úmidos, a partir de valores obtidos de temperatura, irradiação solar, umidade relativa e velocidade do ar.

Cruz (2001) desenvolveu um modelo fuzzy para obtenção do tempo necessário para climatização de silos, com enfoque no consumo de energia. O modelo atuava com base em dados obtidos de umidade e temperatura interna e externa ao silo, a partir disso, sugeria taxas de rotação adequadas para as baterias de ventiladores.

Um controlador inteligente foi desenvolvido por Dogra e Chandra (2002), consistindo de um simples microcomputador Intel386 integrado aos sistemas de ventilação, nebulização, iluminação artificial e resfriamento evaporativo, em uma estrutura de 500m². Utilizando Lógica “*Fuzzy*”, sua metodologia de controle se baseava em estabelecer os parâmetros desejados de clima levando em consideração todos os dados obtidos no dia anterior.

Ciokolsz et al. (2002) desenvolveram um modelo de sistema especialista para seleção de sistemas de iluminação, baseado nas performances de crescimento e eficiência elétrica apresentadas por cada tipo de sistema.

Gao e He (2002) realizaram um experimento com o objetivo de desenvolver um protótipo de controlador climático, de baixo custo, totalmente automatizado, consistindo de um microcomputador interligado aos ventiladores, nebulizadores e cortinas. Este controlador foi desenvolvido em linguagem *Assembly* e programado para monitorar somente temperaturas entre 15°C a 55°C, umidade relativa entre 49% a 99% e tempo de mensuração de 10 minutos.

Fontes (2003) desenvolveu um sistema de supervisão e controle de irrigação utilizando técnicas de controladores neurofuzzy, bem como um aplicativo de controle tipo SCADA para supervisão e controle da casa de vegetação. Entre os sensores e o controlador foram eliminados o uso de cabos e a comunicação foi feita através de rádio frequência,

utilizando o protocolo MODBUS/RTU. A grande inovação deste projeto consiste no fato de que parte do processamento é realizada pelos sensores através de microprocessadores acoplados aos mesmos e os dados são posteriormente transmitidos ao computador.

MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo principal de desenvolver e avaliar o modelo computacional foram utilizados os dados climáticos, coletados em visitas técnicas em duas estruturas de produção, com níveis tecnológicos diferentes. Estas foram denominadas estruturas A e B.

IV - MATERIAL

4.1 - Local

4.1.1 - Estrutura A

Esta estrutura consiste numa casa de vegetação experimental do Centro de Biologia Molecular e Engenharia Genética - CBMEG - da Universidade Estadual de Campinas/SP, cuja altitude é de 669m acima do nível do mar, Latitude 22°5'S Longitude 47°5'W O. Esta estrutura é do tipo arco e possui revestimento plástico (polietileno).



Figura 6 – Estrutura A - CEBEMEG/UNICAMP

As dimensões estão apontadas na figura 7.

A - Largura: 4m

B - Altura sob a calha: 2,5m

C - Altura total: 4m

D – Comprimento: 8m

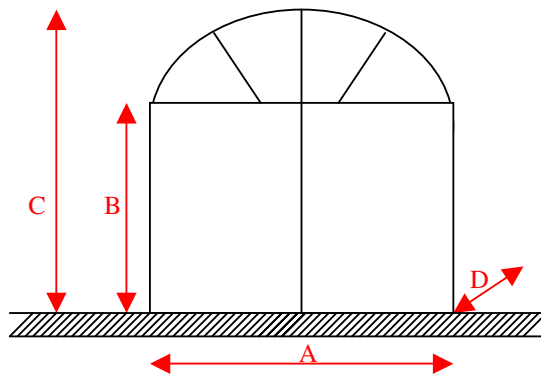


Figura 7 – Forma e dimensões da estrutura A

4.1.1.1 – Equipamentos

A casa de vegetação tem como equipamentos, uma bomba para irrigação (figura 8), a qual é feita por gotejamento, cujas especificações estão na tabela 3.



Figura 8 – Bomba de Irrigação – Estrutura A

Tabela 3 – Motor de Indução da Bomba de Irrigação

Marca - Eberle Mod PD56E033495						
Pólos	Potência (CV)	Voltagem (V)	Fases	Corrente	Pólos	Rotação (RPM)
2	1.5	220/380	3	4.7/2.7	2	3470

Também possui iluminação artificial, composta por um conjunto de 65 lâmpadas incandescentes, consistindo de 5 linhas com 13 lâmpadas cada, como ilustra a figura 9. A tabela 4 mostra as características da lâmpada.



Figura 9 – Conjunto de Iluminação Artificial

Tabela 4 – Especificações de Iluminação Artificial

Marca - Sylvania K-75	
Tipo	Refletores (100W)
Tensão	200V

Nesta estrutura, encontrava-se instalado um par de ventiladores mas devido a problemas de ordem técnica e fitossanitário, permaneceu desativado no período de coleta de dados.

4.1.1.2 – Controles

Ambos os equipamentos (Bomba de irrigação e Iluminação) são controlados por temporizadores, para o controle do fotoperíodo e irrigação, conforme figura 10.

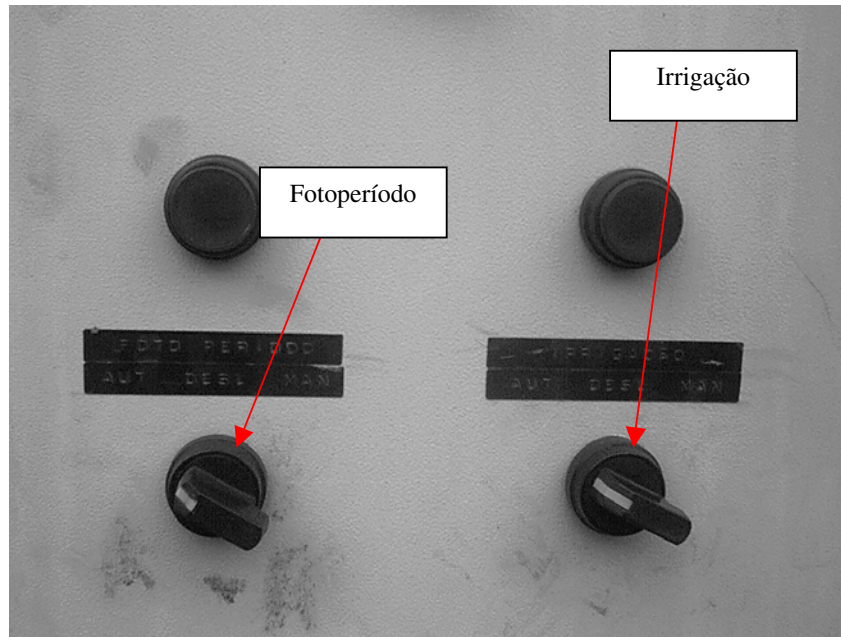


Figura 10 – Controles da Estrutura A

4.1.1.3 - Variáveis elétricas

As variáveis elétricas adquiridas nesta estrutura foram demanda, fator de potência e consumo de energia elétrica, por meio de um analisador e medidor de energia multivariável, ESB - SAGA 4000 (figura 11), instalado na caixa de distribuição de circuitos para medição do motor da bomba e conjunto de lâmpadas. Os registros consistem nas médias horárias.

O medidor de energia apresenta em um visor digital o tempo programado de acordo com a necessidade de avaliação a ser feita. Este visor mostra a qualquer tempo os

valores das grandezas elétricas que estão sendo avaliadas. Este também possui interface de comunicação de dados para compartilhamento dos dados adquiridos para um computador pessoal (*Desktop*) facilitando sua análise.



Figura 11 – Analisador e medidor de energia multivariável - SAGA 4000

4.1.1.4 – Sensores e Sistema de aquisição de dados

As variáveis ambientais medidas foram temperatura ar e umidade relativa, através de um transmissor eletrônico NOVUS RHT-RM (figura 12), acoplado a um acumulador e registrador de dados (Field Logger – Marca NOVUS). Estes foram dispostos nos dois extremos da estrutura.



Figura 12 – Transmissor eletrônico de temperatura e umidade Novus RHT-RM

O Field Logger (figura 13) é um equipamento microprocessado de aquisição e registro de variáveis analógicas. Os canais de entrada universais tornam o Field Logger um instrumento muito versátil, o que possibilita sua utilização em inúmeras aplicações.

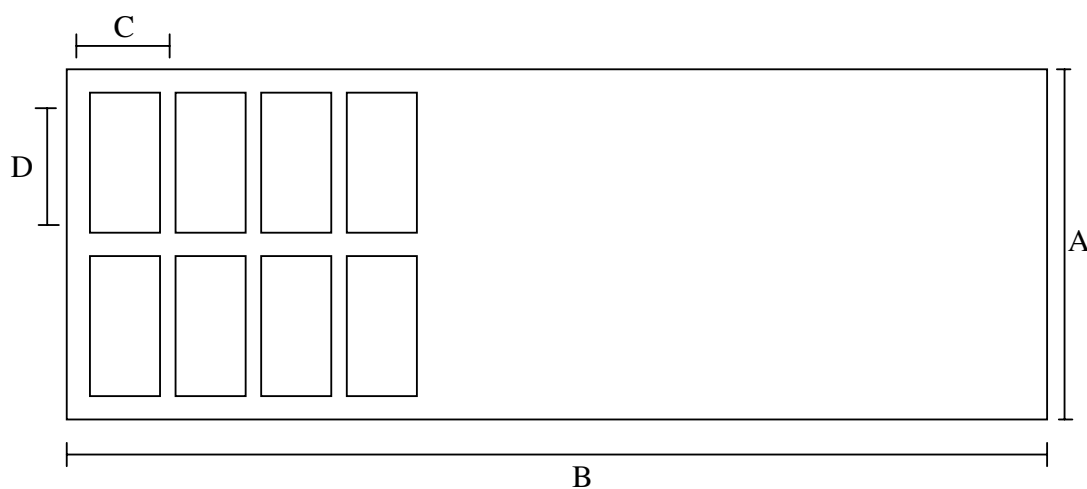
Sua configuração é feita através de um programa computacional de operação (Field Chart). Este programa acompanha o equipamento e opera sobre plataformas Windows 95/98/NT/XP.



Figura 13 – Equipamento de aquisição de dados Field Logger

4.1.2 - Estrutura B

A estrutura B consiste numa casa de vegetação comercial, localizada no município de Andradas – MG, cuja altitude é de 920m e tem sua posição marcada pelas coordenadas geográficas 22°04'05" S e 46°34'04" W. Esta estrutura possui cobertura com revestimento de material plástico (polietileno). Suas dimensões são dadas na figura 14:

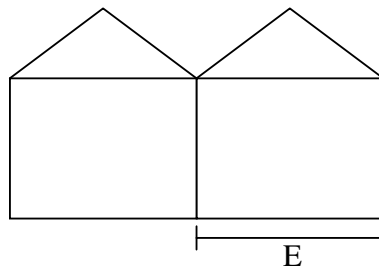


A - Largura do Total: 16m

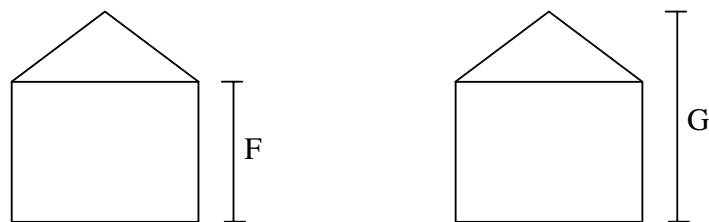
B – Comprimento Total: 64m

C – Largura dos Canteiros: 1,50m

D – Comprimento dos Canteiros: 7,75m



E - Largura do Módulo: 8m



F - Altura do Pé Direito: 2,5m

G - Altura do Piso até a cumeeira: 4,00m

Figura 14 – Formas e dimensões da estrutura B

4.1.2.1 – Equipamentos

De acordo com dados fornecidos pelo produtor, esta estrutura possui maior grau de controle, dispondo dos seguintes equipamentos:

- Sistema de nebulização por micro-aspersão
- Pad-Fan
- Iluminação artificial
- Ventiladores
- Exaustor

- Cortinas Horizontais
- Cortinas Verticais

4.1.2.2 – Controles

Os equipamentos são controlados por controles automáticos baseados em *set-points*, os demais equipamentos dependem de intervenção humana no processo.

4.1.2.3 - Sistema de aquisição de dados

As variáveis ambientais medidas foram temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, umidade relativa, taxa de luminosidade, radiação solar, cedidas pelo produtor.

4.2 - Período do Experimento

A coleta de dados da estrutura A ocorreu durante o período de 16/07/2004 a 13/08/2004, onde os valores correspondem a média da hora. As medições ocorreram durante o período de 24 horas.

Quanto à estrutura B, conforme citado acima, os dados foram fornecidos pelo produtor, sendo este o responsável pela aquisição manual dos mesmos. Ocorreu durante o período de 28/03/2004 a 06/04/2004. As medições compreendem o período das 8:00 às 18:00 horas.

4.3 – Recursos Computacionais

As simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas usando equipamentos e instrumentos do Laboratório Técnico de Eletrificação Rural - LETER, ambos localizados na da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI / UNICAMP.

Quanto aos softwares, foram utilizados o Fuzzy Logical Toolbox do MATHLAB®, versão 6.4, para testes dos conjuntos e regras. A linguagem de programação utilizada para codificar o programa computacional foi o Delphi® (Object Pascal), versão 4, utilizando a plataforma Windows XP®.

O banco de dados escolhido foi o PARADOX®, versão 7.0, compatível com a linguagem Delphi®. Outro motivo desta escolha deve-se ao fato da possibilidade do programa computacional pode ser operado em plataformas Linux®, além do Windows®.

V – MÉTODOS

5.1 - Variáveis ambientais

O modelo computacional é capaz de processar e analisar as seguintes variáveis ambientais: radiação PAR e Global, temperatura e umidade (internas e externas à estrutura), velocidade de vento, luminosidade, temperatura da folha e do solo.

Os tópicos a seguir referem-se aos cálculos incorporados ao modelo, que atuam em conjunto com estas variáveis, para definir o estado presente do ambiente interno da estrutura.

5.2 - Balanço Energético

Segundo a literatura (Albright, 1990), os cálculos de balanço energético são utilizados para obter os índices de ganhos ou perdas de calor em estruturas, com a finalidade de manter um ambiente sob as condições desejadas de conforto. Esta quantidade de calor é calculada para duas condições, inverno e verão, de modo a nunca ter-se situações de desconforto térmico nas épocas críticas do ano. Estes cálculos em conjunto com o cálculo de déficit de pressão de vapor folha-ar, explicado a seguir, compõem o núcleo do modelo computacional. A figura 15 demonstra as fontes de ganhos ou perdas de calor no interior de casas de vegetação.

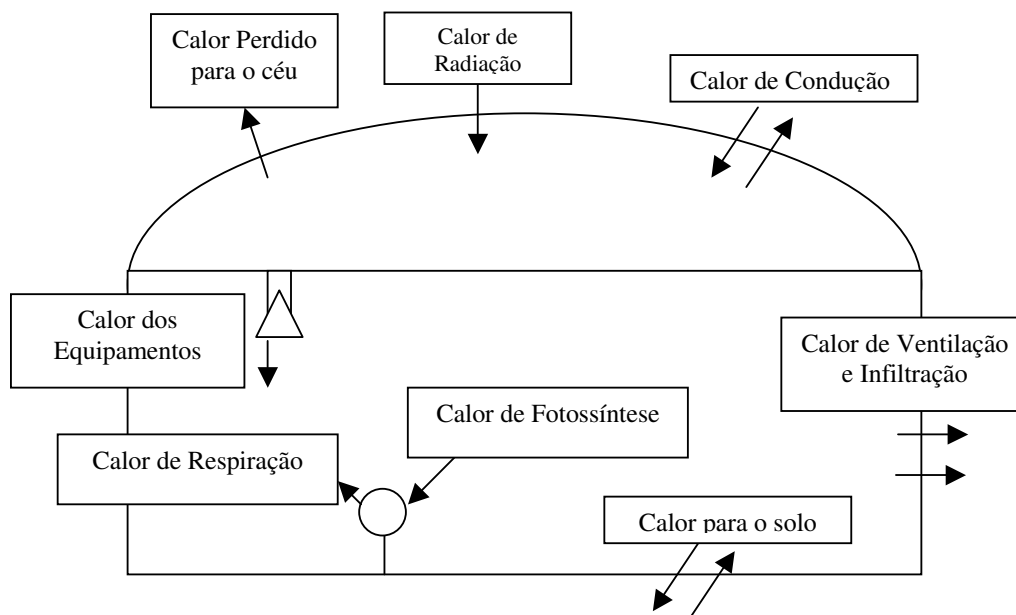


Figura 15 – Fontes de calor no interior de casas de vegetação
Fonte: ASAE

5.2.1 - Calor de radiação

Partindo do princípio de que a energia solar é essencial para o crescimento das plantas, a cobertura da estufa deve permitir a sua entrada, particularmente no inverno, quando os níveis de iluminação natural são baixos, entretanto isto acarreta em acúmulo de calor no ambiente interno. O cálculo do ganho de calor devido à energia solar é dado pela equação 1.

$$q_{\text{rad}} = \tau \cdot I \cdot A_p \quad (1)$$

Onde:

q_{rad} = Calor de radiação, kW

τ = Transmitância da cobertura da estufa para a radiação solar (adimensional)

I = Intensidade solar na superfície horizontal, kW/m²

$A_p = \text{Área de piso da estufa, m}^2$

5.2.2 - Calor de respiração

Compreende aos ganhos de calor obtidos pela respiração da planta. Este por sua vez é muito pequeno e varia significativamente de acordo com as condições da planta, luminosidade e temperatura. O cálculo necessário é feito pela equação 2

$$q_{\text{resp}} = 0,10 \cdot q_{\text{fot}} \quad (2)$$

Onde:

q_{resp} = Calor de respiração, kW

0,10 = Coeficiente de evapo-transpiração

q_{fot} = Calor de Fotossíntese, kW

5.2.3 - Calor de fotossíntese

Os ganhos de calor provenientes da fotossíntese são bem maiores que os da respiração, mas bem menores se comparados aos demais. A respiração existe apenas quando a radiação solar está presente e pode ser negligenciada na ausência desta. A equação 3 demonstra como obter os valores relativos a este ganho.

$$q_{\text{fot}} = 0,03 \cdot q_{\text{rad}} \quad (3)$$

Onde:

q_{fot} = Calor de fotossíntese, kW

0,03 = Coeficiente de fotossíntese

q_{rad} = Calor de radiação, kW

5.2.4 - Calor de radiação perdido para o céu

A transferência de calor por radiação térmica diretamente pela cobertura da estufa e o céu pode ser um fator significativo quando a cobertura for de polietileno. No caso, as estruturas estudadas possuem este tipo de revestimento, onde há altos índices de transparência para a radiação térmica. A equação 4 foi demonstra este cálculo.

$$q_{\text{rtc}} = \varepsilon \cdot \tau \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_i^4 - \varepsilon_a \cdot T_e^4), \quad (4)$$

Onde :

q_{rtc} = Calor de radiação perdido para o céu, kW

ε = Coeficiente de emissividade das superfícies interiores

τ = Coeficiente de transmitância térmica

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$;

A_p = Área de Total, m^2

T_i = Temperatura Interna, K

T_e = Temperatura Externa, K

ε_a = Coeficiente de emissividade atmosférica aparente

5.2.5 - Calor de condução

Dentre as diversas formas de fluxo de energia, os ganhos ou perdas de calor por condução são os mais significantes, influenciando drasticamente o ambiente interno. Em situações em que a ventilação é requerida e a temperatura interna é maior que a externa, a transferência de calor por condução é uma perda. O inverso seria quando resfriada por um sistema evaporativo e a temperatura interna seja menor que a externa, sendo assim haverá ganhos de calor por condução. A equação 5 representa a estimativa do calor de condução.

$$q_{\text{cond}} = \frac{U \cdot A}{1000} (T_i + T_o) \quad (5)$$

Onde:

q_{cond} = Calor de condução, kW

U = Coeficiente global de transferência de calor = 6,8 W/m²°C

A = Área de Cobertura da estufa, m²

T_o = Temperatura de bulbo seco externa, °C

T_i = Temperatura de bulbo seco interna, °C

5.2.6 - Calor transferido para o solo

Este pode ser ganho ou perda de calor, dependendo do diferencial de temperatura interna e externa. Caso a temperatura do ambiente seja menor que a temperatura de solo haverá perda de calor, caso contrário um ganho. A equação 6 mostra como se obter esta taxa de transferência.

$$q_{\text{pis}} = F \cdot P \cdot \Delta T \quad (6)$$

Onde:

q_{pis} = Calor transferido para o solo, kW

$F = 1$

P = Perímetro da estufa, m

ΔT = Temperatura de bulbo seco externa – Temperatura de bulbo seco interna, °C

5.2.7 - Calor de infiltração

A infiltração é um movimento natural de ar através de frestas e pequenas aberturas na estrutura da estufa. Não é passível de controle direto e possui alta variabilidade dependendo do tipo de estrutura. Pode-se usar a equação 7 a estimativa deste parâmetro.

$$q_{\text{inf}} = E \cdot F_a \cdot q_{\text{rad}} \quad (7)$$

Onde:

q_{inf} = Calor de infiltração, kW

E = Taxa de evapo-transpiração (no caso, o valor estimado de 0,10)

F = Porção da estufa ocupada pela produção de plantas

q_{rad} = Calor de Radiação, kW

5.3 - Cálculos Psicrométricos

Neste estudo, a compreensão do comportamento da mistura ar e vapor de água é um tópico de grande importância para obtenção do conforto térmico de ambientes para plantas e fornece dados importantes para o cálculo do déficit de pressão de vapor folha-ar, fator este primordial para o modelo proposto e será discutido a seguir. Neste modelo, as equações utilizadas foram para o cálculo de pressão de vapor do ar saturado e pressão de vapor parcial do ar, ambos contemplando o ambiente interno/externo a estrutura, com a finalidade de calcular a pressão de vapor do ar superfície da folha. Segundo Leal (2000), as equações usadas para os cálculos são dadas a seguir:

5.3.1 - Cálculo de pressão de vapor do ar saturado externo

A equação 8 exprime o cálculo da pressão de vapor do ar saturado externo a estrutura de cultivo.

$$P_{vs_e} = 0.6108 \frac{(7.5 * T_{bu_e})}{(237.3 + T_{bu_e})} \quad (8)$$

Onde:

P_{vs_e} = Pressão de vapor do ar saturado externo, Pa

T_{bu_e} = Temperatura de Bulbo Úmido Externo, °C

5.4.2 - Cálculo de pressão de vapor atual (parcial) do ar externo

A equação 9 exprime o cálculo da pressão de vapor parcial do ar externo a estrutura de cultivo.

$$P_{v_e} = P_{vs_e} - 0.0008 * P_{atm} * (T_{bs_e} * T_{bu_e}) \quad (9)$$

Onde:

P_{v_e} = Pressão de vapor atual (parcial) do ar externo

T_{bu_e} = Temperatura de Bulbo Úmido Externo, °C

T_{bs_e} = Temperatura de Bulbo Seco Externo, °C

P_{atm} = Pressão atmosférica local, Pa

P_{vs_e} = Pressão de vapor do ar saturado externo, Pa

5.3.3 - Cálculo de pressão de vapor do ar saturado interno

A equação 10 exprime o cálculo da pressão de vapor do ar saturado no meio interno.

$$P_{vs_i} = \left[\frac{6.108 * 10^{\frac{(7.5 * T_{bu_i})}{(237.3 + T_{bu_i})}}}{10} \right] \quad (10)$$

Onde:

P_{vs_i} = Pressão de vapor do ar saturado interno, Pa

T_{bu_i} = Temperatura de Bulbo Úmido Externo, °C

T_{bs_i} = Temperatura de Bulbo Seco Externo, °C

5.3.4 - Cálculo de pressão de vapor atual (parcial) do ar interno

A equação 11 demonstra como obter o cálculo da pressão de vapor do ar saturado no meio interno

$$P_{v_i} = P_{vs_i} - (0.000646 * (1 + 0.000946 * T_{bu_i})) * \left(\frac{P_{atm}}{10} \right) * (T_{bs_I} - T_{bu_I}) \quad (11)$$

Onde:

P_{v_i} = Pressão de vapor atual (parcial) do ar interno, Pa

P_{vs_i} = Pressão de vapor do ar saturado interno, Pa

T_{bu_i} = Temperatura de Bulbo Úmido Externo, °C

T_{bs_i} = Temperatura de Bulbo Seco Externo, °C

P_{atm} = Pressão atmosférica local, Pa

5.3.5 - Cálculo de pressão de vapor do ar na superfície da folha

A equação 12 ilustra a forma de cálculo deste parâmetro.

$$P_{v_f} = 0.6108 \frac{(7.5 * T_f)}{(237.3 + T_f)} \quad (12)$$

Onde:

P_{v_f} = Pressão de vapor do ar na superfície da folha, Pa

T_f = Temperatura da Folha, °C

5.4 - Temperatura de Ponto de Orvalho

Este é um fator crítico em períodos noturnos, onde a umidade do ar tende a aumentar, devido as perdas de calor, seguido de queda na temperatura do ar interno, o que é extremamente prejudicial à planta, ocasionando problemas fitossanitários, e, portanto, deve ser evitada. Segundo Albright (1990), a temperatura de ponto de orvalho é uma função da pressão parcial do vapor de água (p_v) e pode ser calculado pela equação 13 ou 14.

$$t_{po} = -60,45 + 7,0322 \ln(p_v) + 0,37(\ln(p_v))^2 \quad (13)$$

para $-60 \leq t_{bs} < 0$ °C e t_{po} em °C,

ou

$$t_{po} = -35,957 - 1,8726 \ln(p_v) + 1,1689(\ln(p_v))^2 \quad (14)$$

para $0 \leq t_{bs} \leq 70$ °C e t_{po} em °C.

Onde:

p_v = pressão parcial do vapor de água, Pa

t_{bs} = temperatura de bulbo seco, °C

5.5 - Déficit de pressão de vapor folha-ar

Conforme citado na literatura (LANGHANS, 1978; HANAN, 1997; BOILY, 1999; ANGELOCCI, 2002), o comportamento estomático tem sido usado como um indicador das condições da planta. Sendo que baixas temperaturas do ambientes e elevados déficits

levam a uma diminuição da abertura estomática, o que provavelmente afeta a absorção radicular.

Sabe-se que os fatores ambientais tais como temperatura, umidade, radiação solar, CO₂ e temperatura de solo concorrem para a regulação estomática, sendo que esta depende também da densidade dos estômatos e do grau de abertura dos mesmos.

A fotossíntese e a transpiração apresentam um tempo de resposta muito rápido quando a planta é submetida a mudanças nas condições microclimáticas. Este tipo de resposta permite que o controle do microclima seja feito para a manutenção de um parâmetro fisiológico indiretamente imensurável, que é o fluxo de gases pelos estômatos. Mantendo-o dentro de um intervalo considerado ideal, ainda que parâmetros de clima variem dentro de certos limites, a planta responderá muito rapidamente à correção de determinado parâmetro microclimatológico mudado pelo acionamento de um controle corretivo.

BOILY (1999) ressalta que o conceito de DPV é atualmente integrado em diversos algoritmos ou softwares desenvolvidos para controles climáticos em casas de vegetação, proporcionando controles mais precisos, enfocando um fator mais importante que somente o controle de clima, isto é o conforto térmico da planta. Sendo assim, cada espécie e fase da cultura (enraizamento, crescimento e corte) possuem um intervalo ideal próprio. Neste projeto, para fins de avaliação, foi utilizado o intervalo padrão de $0,7 \times 10^3$ e $1,2 \times 10^3$ Pa, ou seja, por ser usado independentemente fase ou tipo de cultura.

A equação 15 a seguir fornece a expressão para o cálculo para o déficit de pressão folha-ar.

$$DPV_{folha-ar} = DPV_{ar} - Pv_F \quad (15)$$

Onde:

$DPV_{folha-ar}$: Déficit de pressão Folha-Ar, Pa

DPV_{ar} : Déficit de pressão do Ar, Pa

P_{v_F} : Pressão de vapor na superfície da folha, Pa

5.5.1 - Déficit de pressão de vapor do ar

De acordo com Boily(1999), o conceito de déficit de pressão de vapor do ar é baseado em temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar. O déficit de pressão de vapor do ar, de uma dada temperatura, é a diferença entre a pressão de vapor do ar em saturação e a pressão parcial de vapor de água do ar, expresso na Equação 16.

$$DPV = P_{ws} - P_w \quad (16)$$

Onde:

DPV : Déficit de pressão de vapor de água, Pa

P_{ws} : Pressão de vapor de água do ar a uma dada temperatura em saturação, Pa (em saturação, umidade relativa = 100%)

P_w : Atual pressão de vapor da água a uma dada temperatura, Pa

5.5.2 - Déficit de pressão da folha

Uma das formas de se estimar este déficit é através da mensuração da temperatura da folha, que pode ser tomada como uma estimativa da temperatura da planta. Esta é decorrente do balanço de energia da folha, ou seja, fatores como a temperatura do ar,

energia radiante, da radiação térmica e troca convectiva de calor sensível e latente, não podendo estar dissociada de outros fatores do ambiente externo, tais como: luz, movimentação do ar, temperatura e umidade relativa do ar. Quanto maior a energia radiante, maior a probabilidade da temperatura da folha exceder a temperatura do ar circunvizinho.

A temperatura da folha tende a acompanhar a do ambiente. O aumento da temperatura do ar e da folha, tende a aumentar a diferença de concentração de vapor folha-ar, de modo que mantidos constantes os outros fatores que afetam a perda de água, como as condutâncias difusivas na via de fluxo, o aumento da temperatura do ar tende a provocar um acréscimo da transpiração, até o ponto em que a regulação estomática passa a atuar no sentido de não permitir uma perda excessiva de água. Assim, a temperatura foliar pode ser usada como um indicador do grau de déficit hídrico da planta. A medida da temperatura da folha é um tanto difícil, podendo ser realizada com termopares diminutos aderidos à superfície interior da folha.

5.6 - Complemento de Iluminação

Segundo Angelocci (2002), em períodos de pouca luz durante estações do ano, luz suplementar pode ser usada para manter e promover o crescimento das plantas. Qualquer fonte de energia pode ser usada desde que forneça luz num efetivo comprimento de onda para os processos vitais das plantas. Lâmpadas incandescentes são usadas porque a emissão de luz na porção do espectro vermelho favorece o controle do fotoperíodo, enquanto que as lâmpadas fluorescentes de alta intensidade têm sido usadas para controlar e favorecer o processo de fotossíntese. No modelo computacional, as equações 17, 18 e 19 (Leal, 2000) são utilizadas em conjunto para obtenção do fotoperíodo, com a finalidade de avaliar a necessidade ou não

de complemento através da iluminação artificial. É importante ressaltar que a planta não absorve radiação durante todo o dia, uma vez que há variações nos espectros de luz incidentes. Sendo assim, foi adotado o intervalo entre 8:00 e 12:00, período em que o espectro varia do ultra-violeta aos tons de azul, ideais para a fotossíntese.

Angulo horário do nascer do sol (h): corresponde a meia varredura da trajetória do Sol acima do horizonte, ou seja, do nascer do Sol ao meio-dia.

$$\cos (h) = - \tan (\delta) \cdot \tan (\theta) \quad (17)$$

h = Angulo horário do nascer do sol

θ = Latitude local

Declinação: compreende ao ângulo que a linha que liga o centro do Sol ao centro da Terra faz com o plano do Equador, correspondendo à posição relativa do Sol sobre a superfície da Terra. A equação aproximada para calcular a declinação (δ), é dada por:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[\frac{360^\circ}{365} \cdot (284 + n) \right] \quad (18)$$

Onde:

δ = declinação

n = número de dias passados no ano

A partir do ângulo horário, pode-se determinar o comprimento do dia em horas ou o fotoperíodo (N):

$$N = \frac{(2 \cdot h)}{15^\circ} \quad (19)$$

5.7 - Modelo “Fuzzy”

Utilizando os conceitos da Teoria “Fuzzy”, descritos anteriormente, apresenta-se o modelo “Fuzzy” para a variação de temperatura interna (Ti), temperatura de solo (Tsolo), umidade interna (URi), radiação PAR (Rad_PAR), déficit de pressão de vapor folha-ar (DPV), Ti_Tpo, o qual corresponde a diferença de duas grandezas, a temperatura de ponto de orvalho (Tpo) e interna do ar (Ti).

O funcionamento do controle climático segue o princípio de que como não é possível (e viável) manter constantes os parâmetros internos de uma casa de vegetação ou de um conjunto de casas de vegetação, a estratégia é possibilitar sempre uma variação dentro de uma faixa de controle desejável, já que as plantas toleram algumas variações.

Outros fatores foram importantes para o desenvolvimento do modelo, tais como as dimensões da estrutura, tipo de cobertura, transmissividade da cobertura (plástica) e equipamentos disponíveis (sensores e equipamentos de manutenção de clima), mas estes por sua vez não são uniformes.

5.7.1 - Determinação dos conjuntos “Fuzzy”

Para a obtenção dos conjuntos “Fuzzy”, foi feita a conversão dos parâmetros temperatura de bulbo seco interna (Tbs_i), umidade relativa do ar interno (URi), Radiação PAR (Rad_PAR), temperatura de solo (Tsolo) e déficit de pressão de vapor folha-ar (DPV) em

variáveis lingüísticas. Assim, torna-se necessário definir os limites inferior e superior de cada um deles, bem como a amplitude dos intervalos de variação destas grandezas.

Os limites de cada parâmetro foram definidos com base em dados mencionados na literatura (Leal, 2000; Bliska e Honório, 2000), levando em consideração intervalos das espécies de flores cultivadas. As figuras 16 a 21 descrevem estes conjuntos.

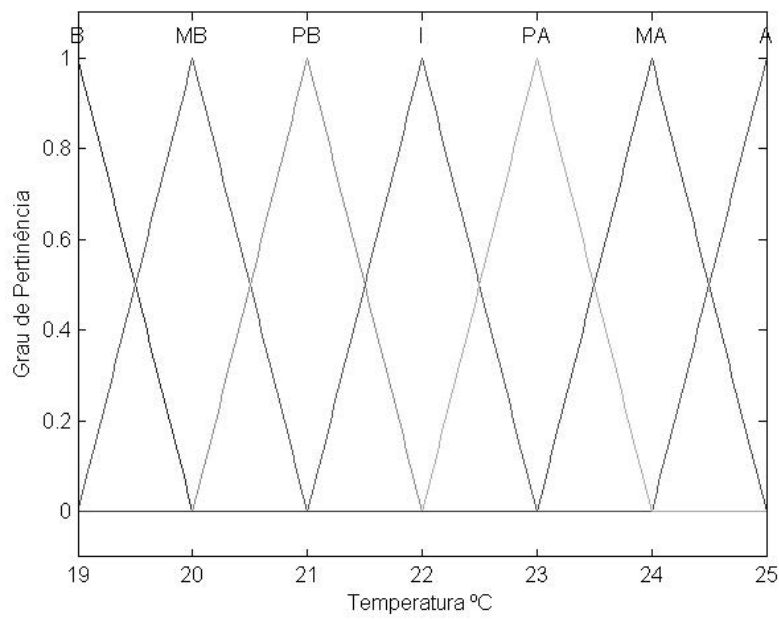


Figura 16 – Conjuntos “Fuzzy” para temperatura de bulbo seco interna (Tbs_i)

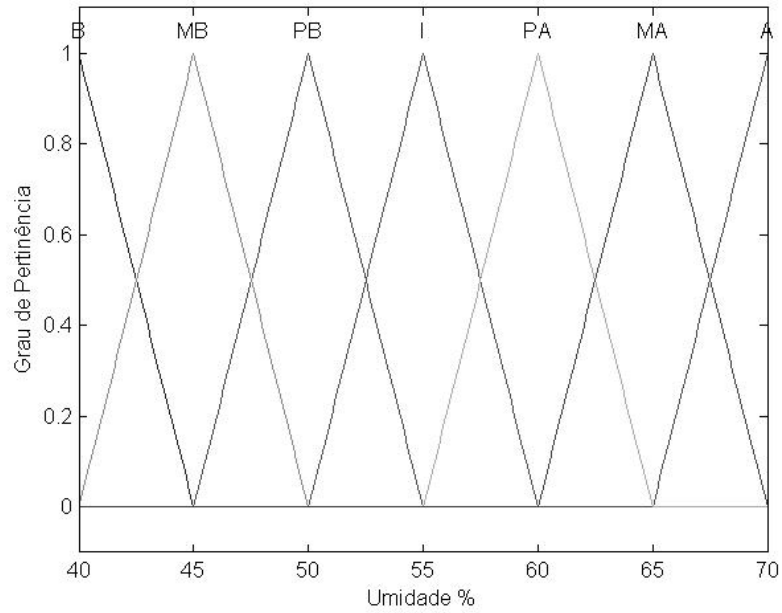


Figura 17 – Conjuntos “Fuzzy” para umidade relativa do ar interno (URi)

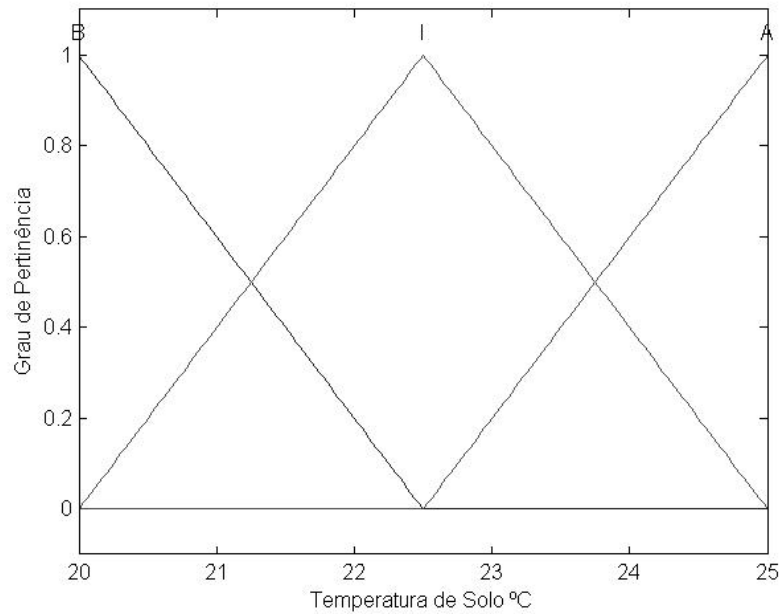


Figura 18 – Conjuntos “Fuzzy” para temperatura de solo (Tsolo)

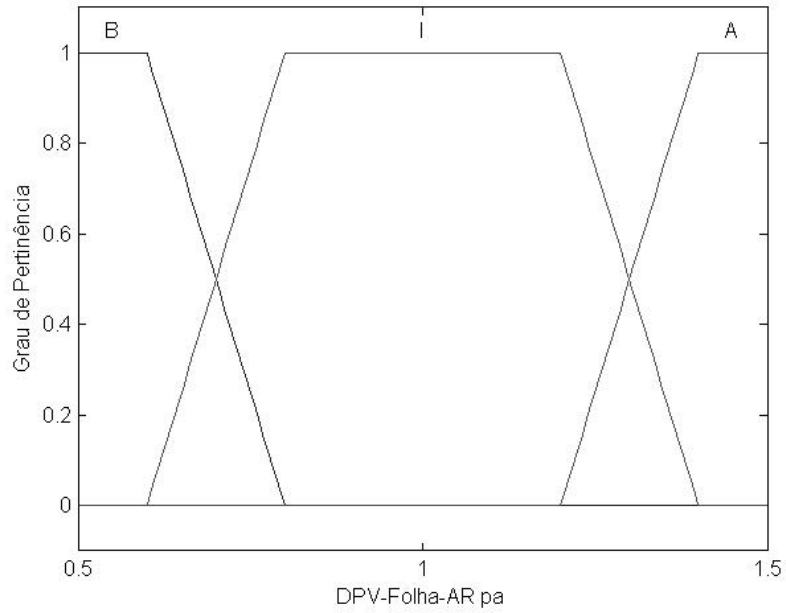


Figura 19 – Conjuntos “Fuzzy” para Déficit de Pressão de Vapor Folha-Ar (DPV)

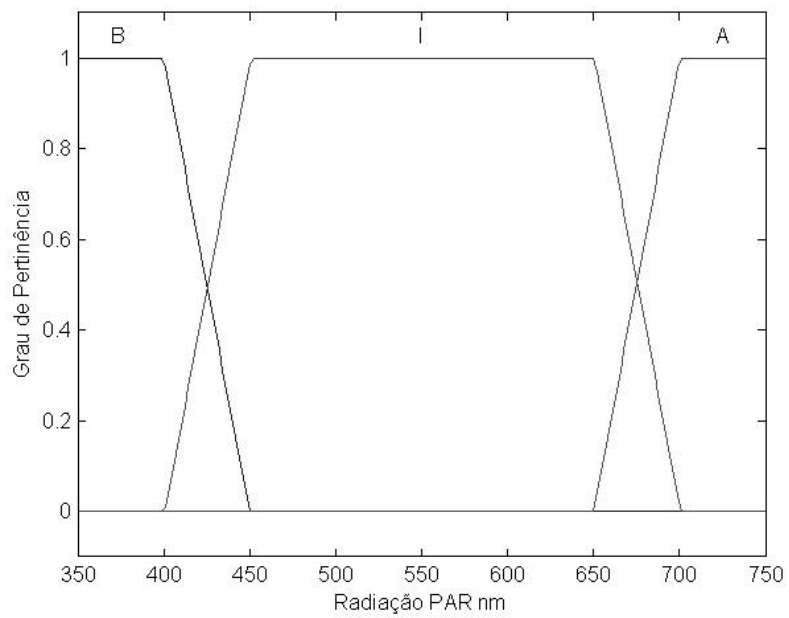


Figura 20 – Conjuntos “Fuzzy” para Radiação Fotossinteticamente Ativa (Rad_PAR)

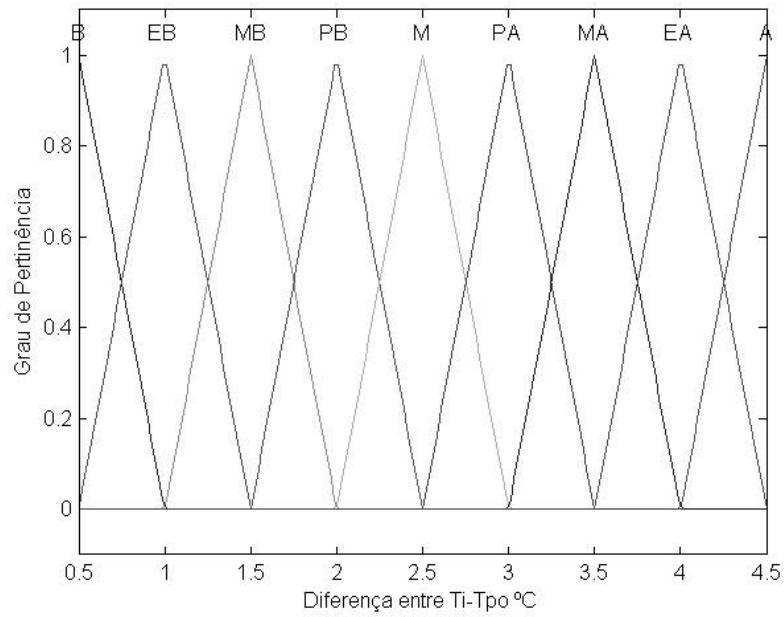


Figura 21 – Conjuntos “Fuzzy” para Diferença entre Temperatura do ar interno e Temperatura de Ponto de Orvalho (Ti-Tpo)

As nomenclaturas e os símbolos dos conjuntos “Fuzzy” adotados estão descritos nas tabelas 5 a 7.

Tabela 5 – Nomeclatura e Símbolos para os conjuntos “Fuzzy” T_i e U_i

Conjuntos “Fuzzy” para T_{bs_i} e U_{r_i}	Símbolo
Baixa	B
Muito Baixa	MB
Pouco Baixa	PB
Ideal	I
Pouco Alta	PA
Muito Alta	MA
Alta	A

Tabela 6 – Nomeclatura e Símbolos para os conjuntos “Fuzzy”

Rad PAR, Tsolo e DPV

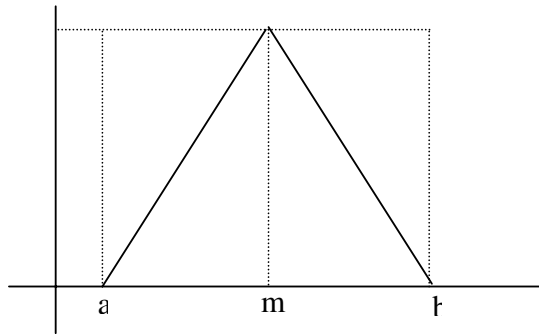
Conjuntos “Fuzzy” para Rad PAR, Tsolo e DPV	Símbolo
Baixa	B
Ideal	I
Alta	A

Tabela 7 – Nomeclatura e Símbolos para os conjuntos “Fuzzy” Ti_Tpo

Conjuntos “Fuzzy” para Tbs_i_Tpo	Símbolo
Baixa	B
Extremamente Baixa	EB
Muito Baixa	MB
Pouco Baixa	PB
Ideal	I
Pouco Alta	PA
Muito Alta	MA
Extremamente Alta	EA
Alta	A

5.7.2 - Funções de Pertinência

Segundo a Teoria “Fuzzy”, os valores no intervalo $[0, 1]$ representam o grau de compatibilidade de um determinado elemento (dado obtido) em relação ao conjunto. Assim, os valores 0 e 1 expressam respectivamente, a completa exclusão e a compatibilidade total deste elemento. Este grau de compatibilidade é conhecido como grau de pertinência e possui diferenças de acordo com o tipo de função (triangular, trapezoidal, gaussiana). As funções triangulares de pertinência para os conjuntos Ti , URi , $Tsolo$ e Ti_Tpo é dadas pela equação 20.

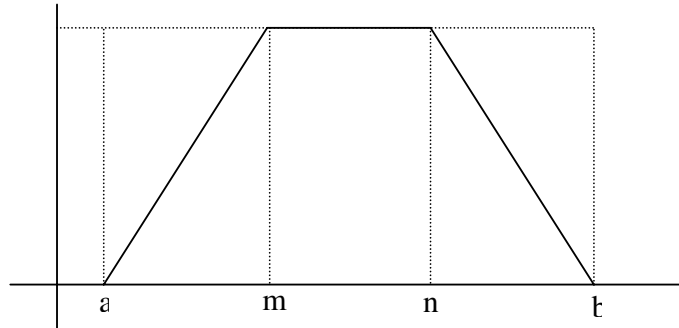


$$\begin{aligned}
 &0 && \text{se } x < a \\
 &\frac{x - a}{m - a} && \text{se } x \text{ estiver no intervalo } [a, m] \\
 & && (20) \\
 &\frac{b - x}{b - m} && \text{se } x \text{ estiver no intervalo } [m, b] \\
 &0 && \text{se } x > b
 \end{aligned}$$

Onde:

x = elemento (dado obtido do ambiente)
 a = limite inferior
 b = limite superior
 m = valor modal

Funções de pertinência trapezoidais para os conjuntos DPV, Rad PAR



$$\begin{aligned}
 &0 && \text{se } x < a \\
 &\frac{x - a}{m - a} && \text{se } x \text{ estiver no intervalo } [a, m] \\
 &1 && \text{se } x \text{ estiver no intervalo } [m, n] \\
 &\frac{b - x}{b - n} && \text{se } x \text{ estiver no intervalo } [n, b] \\
 &0 && \text{se } x > b
 \end{aligned} \tag{21}$$

Onde:

x = elemento (dado obtido do ambiente)
 a = limite inferior
 b = limite superior
 m, n = valores modais

5.7.3 - Base de Conhecimento

A Base de conhecimento é composta pela Base de Regras e pela Base de Dados. Uma vez determinados os graus de pertinência das variáveis ambientais, é possível aplicá-las em um conjunto de regras lingüísticas que definem a estratégia de controle do

sistema, chamada de Base de Regras. A Base de Dados compreende as variáveis agregadas aos conjuntos.

5.7.3.1 - Base de Regras

A base de Regras foi formulada em conjunto com 2 especialistas, um na área de ambiência vegetal e o outro que atua na área de produção de malhas termo-refletoras, dispostas como um roteiro de forma a facilitar o entendimento. A Base abrange as ocorrências mais comuns no interior de ambientes protegidos.

Regras para Período Diurno

Se (Tsolo = ALTA) então

- Verificar se Cortina Horizontal = Instalada
 - Caso Positivo
- Verificar se Cortina Horizontal = Desativada
 - Caso Positivo
 - Ligar Cortina
 - Caso Contrário
 - Sair

Se (Tsolo = BAIXA) then

- Verificar se Cortina Horizontal = Instalada
 - Caso Positivo
- Verificar se Cortina Horizontal = Ativada
 - Caso Positivo
 - Desligar Cortina
 - Caso Contrário
 - Sair

Se (DPV = IDEAL) e (Tbs_i = IDEAL) e (UR_i = IDEAL) e (Rad_PAR = IDEAL) e (Tsolo = IDEAL) então

- Sair
- Caso Contrário
 - Se (DPV = IDEAL) e Tbs_i = ALTA então
 - Executar
 - Cálculo de Carga_Termica;
 - Se Qrad>QRadMax então
 - Verificar se Cortina Horizontal = Instalada
 - Caso Positivo
 - Verificar se Cortina Horizontal = Desativada
 - Caso Positivo
 - Ligar Cortina

Caso Contrário
Sair

Se $(Q_{rad} < Q_{radMax})$ and $(T_{bs_i} = \text{MUITO ALTA})$ então
Verificar se Circulador de Ar = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Circulador de Ar = Desativado
Caso Positivo
Ligar Circulador de Ar
Caso Contrário
Se Circulador de Ar = Não Instalado
Verificar se Ventilador = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Ventilador = Desativado
Caso Positivo
Ligar Ventilador
Caso Contrário Se Ventilador = Não Instalado
Verificar se Exaustor = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Exaustor = Desativado
Caso Positivo
Ligar Exaustor
Caso Contrário Se Exaustor = Não Instalado

Se $(Q_{rad} < Q_{radMax})$ e $(T_{bs_i} = \text{ALTA})$ e $(UR_i = \text{BAIXA})$ então
Verificar se Pad e Fan = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Pad e Fan = Desativado
Caso Positivo
Ligar Pad e Fan
Caso Contrário
Sair

Se $(Q_{rad} < Q_{radMax})$ and $(T_{bs_i} = \text{ALTA})$ and $(UR_i = \text{ALTA})$ then
Verificar se Exaustor = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Exaustor = Desativado
Caso Positivo
Ligar Exaustor
Caso Contrário
Sair

Se $(DPV = \text{IDEAL})$ e $(T_{bs_i} = \text{BAIXA})$ então
Se $Rad_PAR = \text{BAIXA}$ então
Verificar se Cortina = Instalada
Caso Positivo
Verificar se Cortina = Ativada
Caso Positivo
Desligar Cortina
Caso Contrário
Sair

Se $(DPV = \text{IDEAL})$ e $(Rad_PAR = \text{ALTA})$ então
Verificar se Cortina = Instalada

Caso Positivo
Verificar se Cortina = Desativada
Caso Positivo
Ligar Cortina
Caso Contrário
Sair

Se (DPV = IDEAL) e (UR_i = ALTA) e (Tbs_i = BAIXA) então
Verificar se Ventilador = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Ventilador = Desativado
Caso Positivo
Ligar Ventilador
Caso Contrário
Sair

Se (DPV = BAIXA) então
Verificar se Exaustor = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Exaustor = Desativado
Caso Positivo
Ligar Exaustor
Verificar se Cortina Horizontal = Ativada
Caso Positivo
Desligar Cortina Horizontal
Caso Contrário
Sair

Regras para Período Noturno

Se (Ti_Tpo = POUCO BAIXA) então
Verificar se Cortina Lateral = Instalada
Caso Positivo
Verificar se Cortina = Desativada
Caso Positivo
Ligar Cortina Lateral
Caso Contrário
Sair

Se (Ti_Tpo = EXTREMAMENTE BAIXA) então
Verificar se Cortina Lateral = Instalada
Caso Positivo
Verificar se Cortina Lateral = Desativada
Caso Positivo
Ligar Cortina
Verificar se Aquecedor = Instalado
Caso Positivo
Verificar se Aquecedor = Desativado
Caso Positivo
Ligar Aquecedor
Caso Contrário
Sair

VI – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes referentes a estrutura A limitam-se somente a iluminação artificial, devido a ausência de outros equipamentos e sensores para um controle mais preciso.

No caso da estrutura B, as demais potencialidades do programa computacional puderam ser exploradas devido ao maior grau de controle incorporado.

Uma vez que os dados relativos ao clima foram coletados, torna-se possível a aplicação dos testes para avaliação do modelo computacional. Primeiramente, é necessário que o modelo classifique cada parâmetro isoladamente registrado com as variáveis lingüísticas apropriadas (IDEAL, ALTA, BAIXA, etc.), para assim delinear as o estado presente do clima interno. Logo em seguida, estes parâmetros são agrupados nas situações previstas na base de regras e assim são aplicadas as ações de controle correspondentes (ativar ou desativar um equipamento).

Porém, em muitos casos, as variadas casas de vegetação possuem diversos níveis de controle e alguns tipos de dados não poderão ser adquiridos pelo sistema por não possuir um instrumento de mensuração específico (sensores no caso). Partindo deste pressuposto, caso algum parâmetro seja nulo, o sistema pode ser alimentado manualmente por um valor médio local para a época do ano, ou valor nominal de acordo com a literatura apropriada, sempre visando que nenhum cálculo necessário seja negligenciado.

Caso a ausência seja de algum equipamento para manutenção do clima, a base de regras do sistema é configurada por pelo menos duas opções de atuação, caso nenhuma delas seja atendida o sistema apenas informa por meio de mensagens.

6.1 - Estrutura A

Os dados coletados nesta estrutura foram consumo de energia das lâmpadas, temperatura e umidade. Com isto, foi possível avaliar o comportamento do modelo computacional em estruturas com pouco ou nenhum grau de controle; no caso, como já citado, os únicos meios de controle disponíveis consistiam em timers para a bomba de irrigação e iluminação artificial.

6.1.1 - Temperatura e Umidade

O mapeamento da temperatura e umidade foi realizado nos dois extremos da estrutura, objetivando fornecer um parâmetro para o acompanhamento do clima no interior da estrutura. Foram realizadas medições e calculadas as médias dos pontos medidos. Na figura 22, está esquematizado o mapeamento da temperatura.

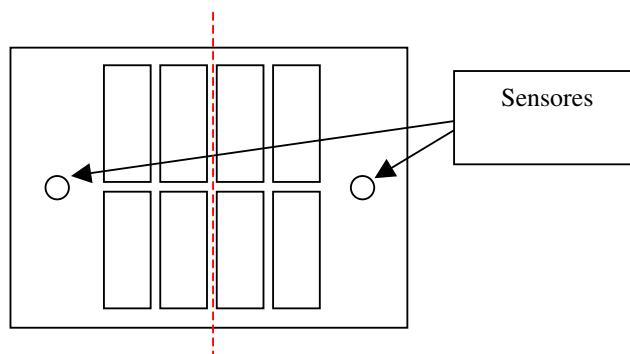


Figura 22 – Disposição dos sensores – Estrutura A

A sala foi dividida em 2 partes, onde há divisões por pilares a cada 4m. As medições foram realizadas em intervalos de 10 minutos e os gráficos das figuras 23 e 24 correspondem as médias da hora.

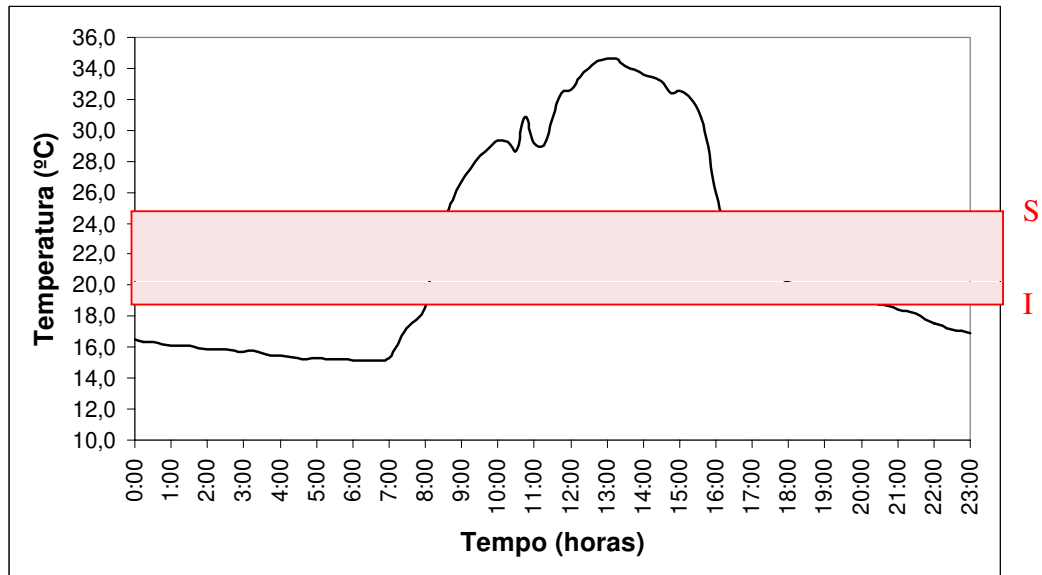


Figura 23 – Gráfico de variação de temperatura – Estrutura A
 S – Limite Superior e I – Limite Inferior

Comparando os dados obtidos, com os parâmetros de avaliação de clima existentes no modelo computacional, é possível observar que os períodos críticos de altas temperaturas estão entre 9:00h e 16:00h e de baixas temperaturas entre 21:00h e 07:00h, ou seja, períodos em que a temperatura está fora do intervalo de tolerância (19 - 25°C) para a planta (18 - 22°C).

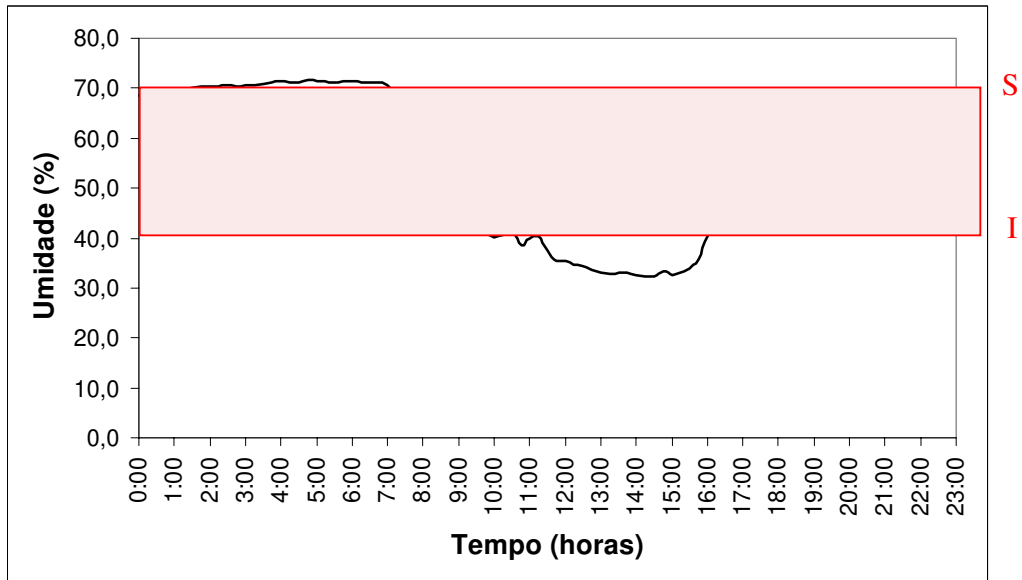


Figura 24 – Gráfico de variação de umidade
S – Limite Superior e I – Limite Inferior

Com relação à umidade, nota-se que esta acompanha de forma inversa a variação da temperatura, porém, o período em que a umidade ultrapassa os intervalos de tolerância implementados no modelo computacional (40 – 70%) foi bem menor do que aquele da temperatura, entre 11:00h e 16:00h. A figura 25 ilustra a relação entre umidade e temperatura durante o dia. A variação observada (altas temperaturas) é decorrente dos ganhos de calor durante o dia, devido à alta incidência de radiação solar e conseqüente retenção pela ausência de meios de ventilação natural ou forçada, e das perdas (baixa umidade) devido ao resfriamento noturno.

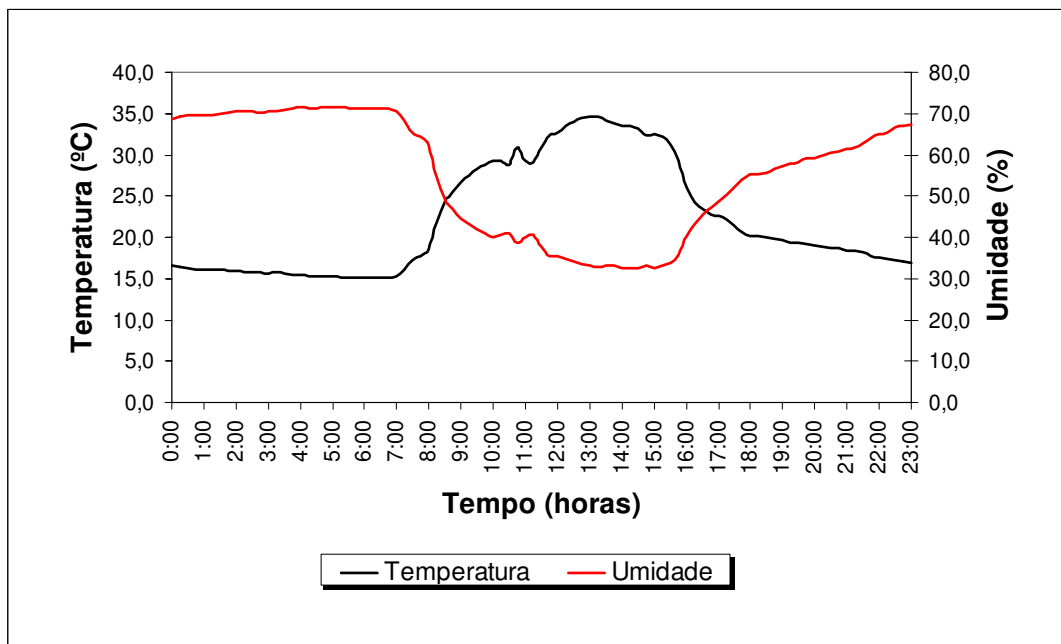


Figura 25 – Relação Umidade e Temperatura - Estrutura A

6.1.2 – Controle

A - Complemento de iluminação

Com os cálculos realizados através do modelo proposto, foram obtidas as médias diárias de incidência solar em condições ambientais uniformes, ou seja, a não presença de nuvens ou qualquer outro tipo de sombreamento total ou parcial. Este é feito com base no período de maior absorção de radiação, entre 8:00h e 12:00h; período em que a luz natural está dentro do espectro de 390 a 700 nm (radiação PAR), ou seja, o espectro ideal para a realização da fotossíntese. Um importante fator a ser considerado é que este cálculo não é realizado utilizando a lógica fuzzy e sim com cálculos convencionais.

A tabela 8 traz as recomendações do modelo computacional para número de minutos adicionais de iluminação artificial, para a estrutura A.

Tabela 8 – Recomendações de iluminação adicional – Estrutura A

Data	Minutos Adicionais	Data	Minutos Adicionais
16/jul	72,8	31/jul	62,2
17/jul	72,1	1/ago	61,5
18/jul	71,4	2/ago	60,8
19/jul	70,7	3/ago	60,1
20/jul	70,0	4/ago	59,4
21/jul	69,3	5/ago	58,7
22/jul	68,6	6/ago	57,9
23/jul	67,8	7/ago	57,2
24/jul	67,1	8/ago	56,5
25/jul	66,4	9/ago	55,8
26/jul	65,7	10/ago	55,1
27/jul	65,0	11/ago	54,4
28/jul	64,3	12/ago	53,7
29/jul	63,6	13/ago	53,0
30/jul	62,9		
Média	65 minutos		

Neste caso, a cultura necessita de 12 horas de iluminação total diária, ou seja, luz natural + artificial (se necessário). Sendo assim, realizando os cálculos de complemento de iluminação, o modelo computacional sugere 65 minutos de iluminação artificial, em média. Entretanto, o funcionamento atual das lâmpadas (iluminação artificial) está em torno de 6 horas por dia, o que caracteriza o uso desnecessário, com conseqüente gasto de energia elétrica, demonstrado na figura 26. Outro importante fato é a geração de calor por este tipo de equipamento, que em muitos casos (altas temperaturas) pode ser indesejável, decorrente do amplo tempo de uso, uma vez que esta estrutura não possui meios de ventilação.

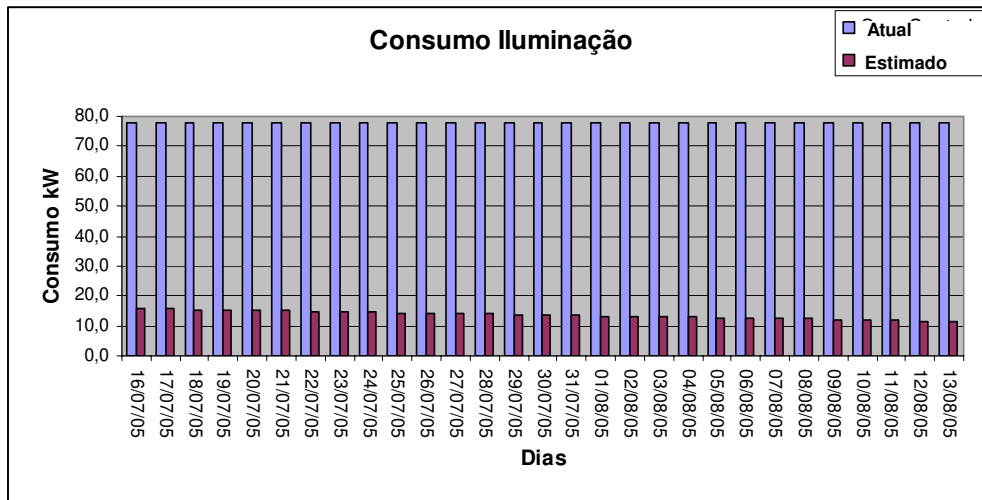


Figura 26 – Consumo de Iluminação – Estrutura A

A figura 27 ilustra a interface de configuração do complemento de iluminação, demonstrando como este parâmetro é inserido no programa computacional de testes.

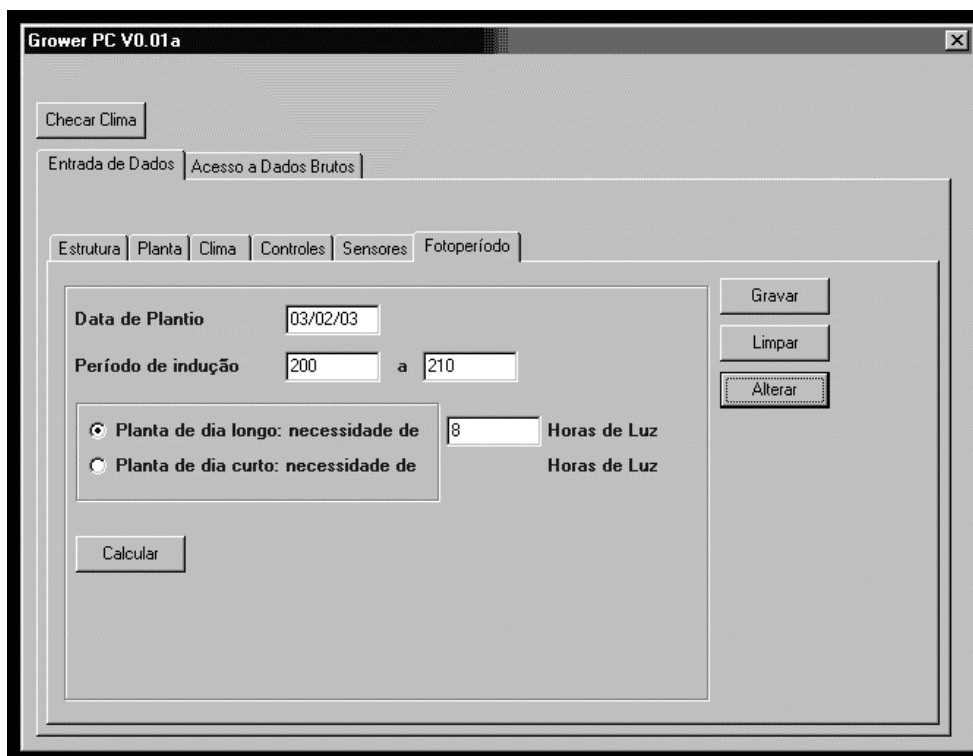


Figura 27 – Tela de configuração para complemento de iluminação

B - Temperatura e Umidade

No caso de temperatura e umidade, devido à inexistência de janelas frontais, aberturas zenitais (ventilação natural), ventiladores ou circuladores (ventilação forçada), torna-se impossível para o modelo recomendar quaisquer ações efetivas para manutenção do clima, entretanto julgou-se necessário monitorá-los, a fim de obter algum parâmetro que ilustre o estado presente do clima interno.

6.2 - Estrutura B

Nesta estrutura, foram coletados dados de radiação global, temperatura de bulbo seco e úmido, umidade relativa e condições meteorológicas (presença de nuvens), no período de 16 dias. Isto propicia a validação do modelo computacional em estruturas com maior grau de controle.

6.2.1 - Temperatura e Umidade

O mapeamento da temperatura e umidade, no interior da estrutura B, consiste em 10 pontos de medição, conforme ilustra a figura 28. A partir destas medições foram calculadas as médias.

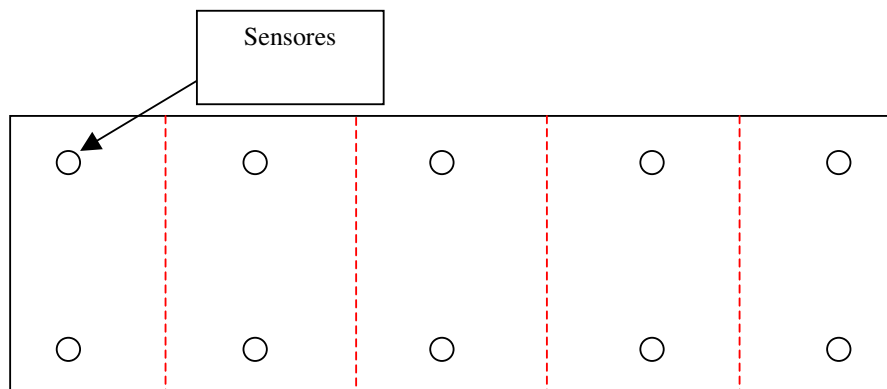
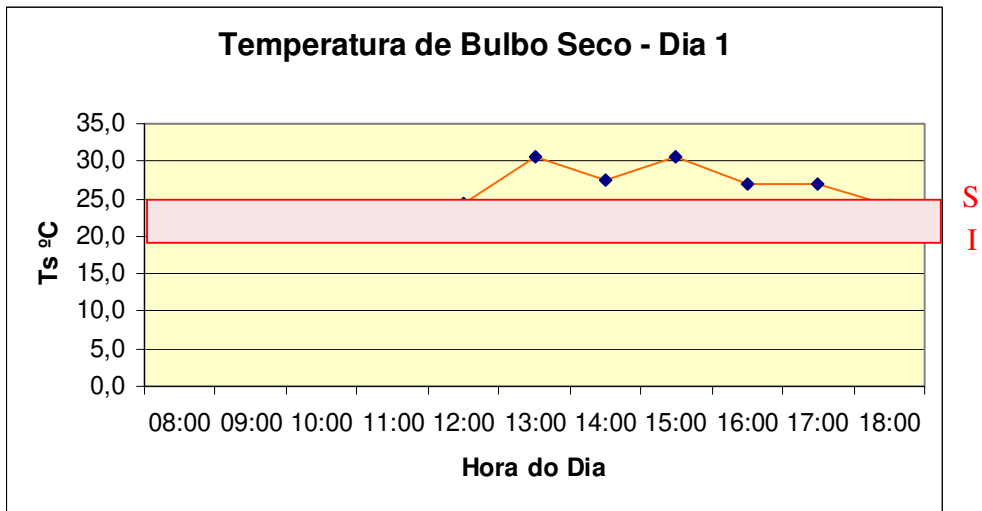


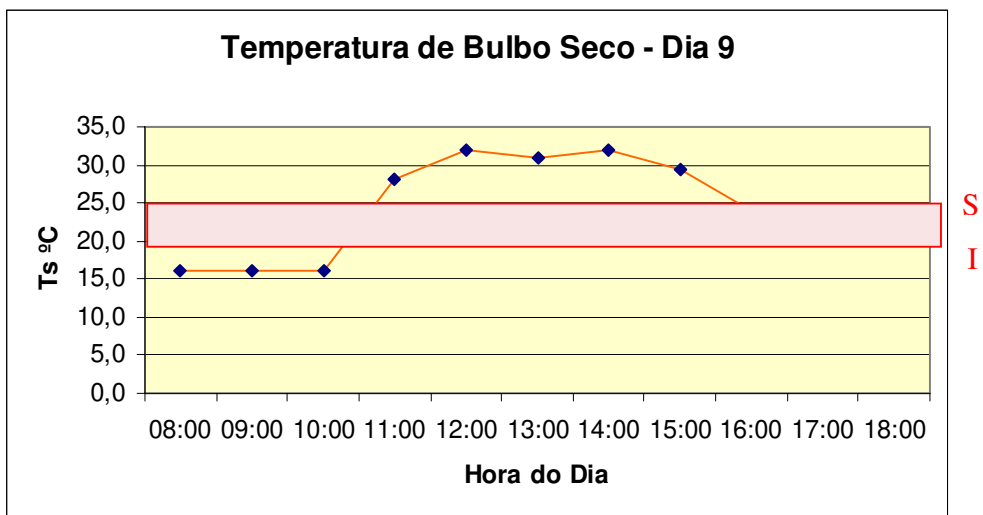
Figura 28 – Disposição dos sensores estrutura B

A estrutura foi dividida em 5 partes, onde há divisões por pilares de sustentação a cada 12,8m. As medições foram realizadas em intervalos de 10 minutos e os gráficos correspondem à média da hora, dentro do período de medição entre 08:00h e 17:00hs.

Nos gráficos da figuras 29 a e b, são demonstradas algumas amostragens diárias da variação de temperatura de bulbo seco.



(a)

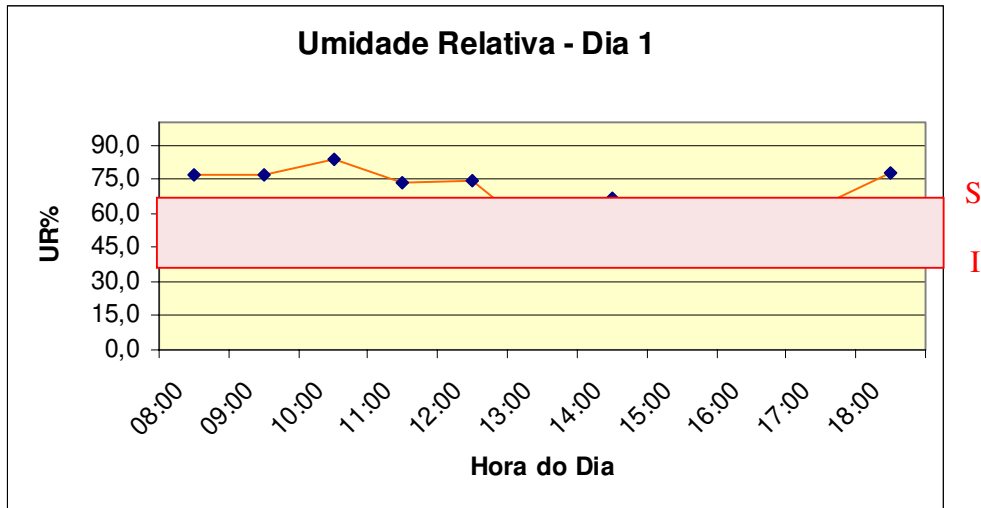


(b)

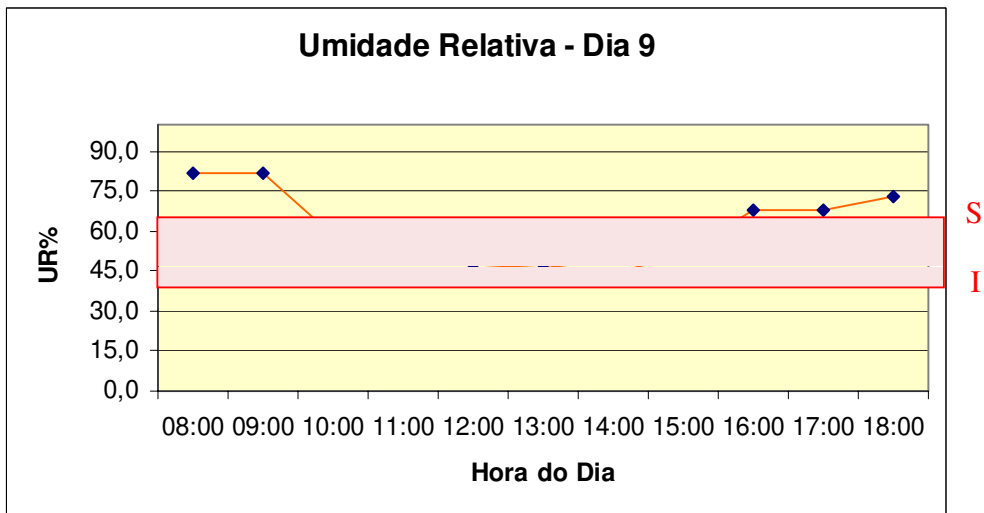
Figura 29 – Gráfico de variação de temperatura
S – Limite Superior e I – Limite Inferior

Comparando os dados obtidos com os parâmetros de avaliação existentes no modelo computacional, é possível observar que os períodos críticos de altas temperaturas estão entre 12:00h e 17:00h para o dia 01. No dia 09, para altas temperaturas, entre 11:00h e

17:00h e de 08:00h as 10:00h de baixas temperaturas, ou seja, períodos em que este parâmetro está fora do intervalo de tolerância (19 - 25°C) para a planta.



(a)



(b)

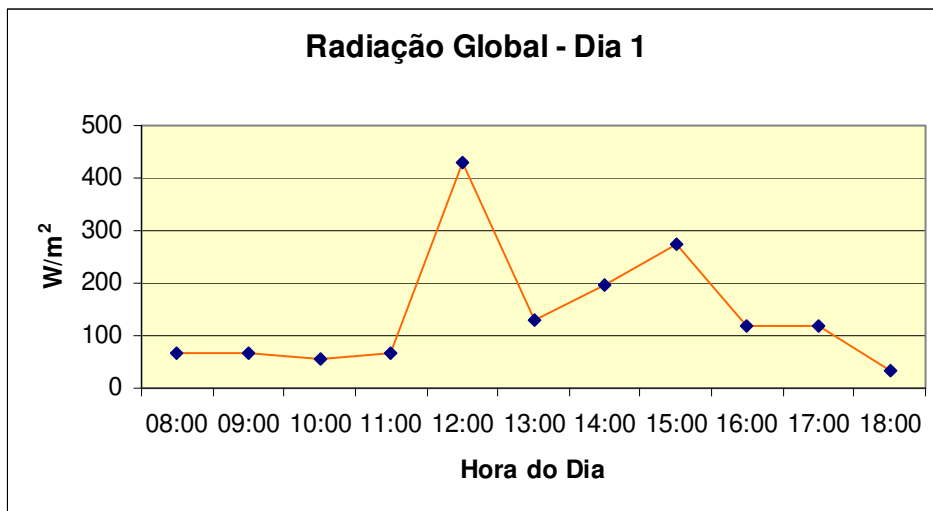
Figura 30 – Gráfico de variação de umidade
S – Limite Superior e I – Limite Inferior

Com relação à umidade, figura 30 a e b, os períodos em que esta ultrapassa o intervalo de tolerância implementados no modelo computacional (40 - 70%), houve certas variações. No dia 01, o período em que estava fora do intervalo, foi entre 08:00h e 12:00h durante a manhã, em que baixou e permaneceu dentro do intervalo tolerado até as 17:00h quando voltou a aumentar.

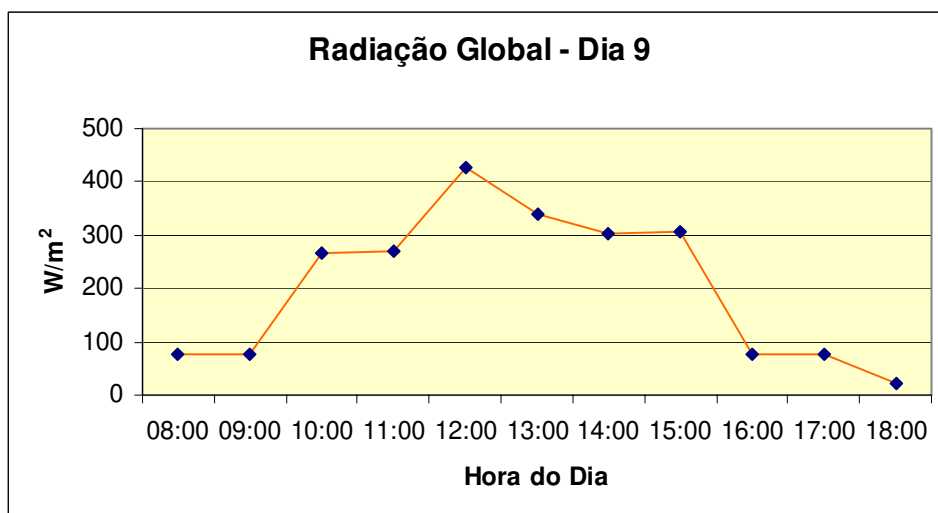
No dia 09, o horário foi entre 08:00h e 09:00h durante a manhã e 17:00h. Nos demais horários a umidade permaneceu dentro do intervalo estabelecido.

6.2.2 - Radiação Solar

A mensuração da incidência de radiação solar global foi medida em um único ponto, fixado no centro da estrutura; os dados correspondem aos índices horários. A figura 31 a e b ilustra, para dois dias, os índices de radiação global no interior da estrutura.



(a)



(b)

Figura 31 – Gráfico de variação de radiação solar

Complementando estes dados, é apresentada a tabela 9, com as condições meteorológicas relativas aos dias que foram coletados os dados.

Tabela 9 – Condições climáticas

Dias	1	9
08:00	Limpo	Limpo
09:00	Limpo	Limpo
10:00	Nublado	Limpo
11:00	Nublado	Limpo
12:00	Limpo	Limpo
13:00	Nublado	Limpo
14:00	Nublado	Limpo
15:00	Nublado	Parc Nub
16:00	Nublado	Nublado
17:00	Nublado	Nublado
18:00	Nublado	Nublado

Nos gráficos anteriores, nota-se que o intervalo em que a incidência solar é maior corresponde o período 10:00h às 15:00h para o dia 9. Comparando com a tabela 9, é possível perceber que a condição de céu limpo permaneceu durante grande parte do dia. Entretanto, fatores como condições meteorológicas podem afetar esta incidência. Nota-se que no dia 1 esteve em grande parte nublado.

6.2.3 - Controle

Ações de Controle

Como exemplificação das avaliações dos parâmetros climáticos que podem ser adquiridas pelo modelo, foram tomados como exemplo as ocorrências do dia 01. A tabela 10 traz as avaliações de pertinência referentes aos dados de temperatura obtidos.

Tabela 10 – Avaliação dos dados de temperatura (dia 1)

Dia 01								
Horário	Temperatura	B	MB	PB	I	PA	MA	A
08:00	22	0	0	0	1	0	0	0
09:00	22	0	0	0	1	0	0	0
10:00	22	0	0	0	1	0	0	0
11:00	23	0	0	0	0	1	0	0
12:00	24,5	0	0	0	0	0	0,5	0,5
13:00	30,5	0	0	0	0	0	0	1
14:00	27,5	0	0	0	0	0	0	1
15:00	30,5	0	0	0	0	0	0	1
16:00	27	0	0	0	0	0	0	1
17:00	27	0	0	0	0	0	0	1
18:00	24	0	0	0	0	0	1	0

Na tabela 11, têm-se as avaliações de pertinência dos dados de umidade relativa no dia 1.

Tabela 11 – Avaliação dos dados de temperatura

Dia 01								
Horário	Umidade	B	MB	PB	I	PA	MA	A
08:00	76,9	0	0	0	0	0	0	1
09:00	76,9	0	0	0	0	0	0	1
10:00	83,7	0	0	0	0	0	0	1
11:00	73,8	0	0	0	0	0	0	1
12:00	74,6	0	0	0	0	0	0	1
13:00	49,8	0	0,04	0,96	0	0	0	0
14:00	66,8	0	0	0	0	0	0,64	0,36
15:00	54,9	0	0	0,02	0,98	0	0	0
16:00	63,4	0	0	0	0	0,32	0,68	0
17:00	63,4	0	0	0	0	0,32	0,68	0
18:00	77,8	0	0	0	0	0	0	1

Onde:

B – Baixa
 MB – Muito Baixa
 PB – Pouco Baixa
 PA – Pouco Alta
 MA – Muito Alta
 A - Alta

Observando a tabela do dia 01, para temperatura, pode-se perceber que no período das 8:00h as 10:00h, permaneceu dentro do conjunto classificado plenamente como

IDEAL com grau de pertinência 1 (100%). Às 11:00h, nota-se um início de elevação, passando a ser classificado como pertencente ao conjunto POUCO ALTA, com grau de pertinência 1 (100%); esta tendência de elevação se mantém. Por volta das 12:00h, tem-se uma situação de “*crossover*”, ou seja, o dado obtido pode ser classificado em dois conjuntos diferentes com grau de pertinência de 0,5 em POUCO ALTA e 0,5 em ALTA (50%). Nestes casos, o processo de tomada de decisão do modelo está codificado para optar pelo conjunto mais crítico; sendo assim, seria classificado como ALTA.

Durante o restante do dia, 13:00h às 17:00h, a temperatura se mantém classificada como ALTA até as 18:00h, quando é possível notar ligeira queda, sendo classificada como POUCO ALTA.

No caso da umidade nota-se que no decorrer do dia há muitas variações. No período das 8:00h às 12:00h, esta permanece na classificação ALTA. Então, nota-se um decréscimo por volta de 13:00 (POUCO BAIXA - 0,96). Às 14:00h, eleva-se novamente (MUITO ALTA – 0,64). No período das 15:00h, retorna ao nível de conforto (IDEAL – 1,0) e, então, no período das 16:00h as 17:00h, é perceptível a tendência de elevação até as 18:00h quando permanece plenamente fora dos parâmetros (ALTA – 1,0).

Neste caso específico, os parâmetros nominais foram velocidade de vento, temperatura e umidade externa. No caso da radiação PAR e temperatura do solo, foram alimentados com valores classificados como IDEAL. A tabela 12 mostra os valores para estes parâmetros.

Tabela 12 – Valores padrão utilizados

Parâmetro	Valor Nominal
Radiação PAR	550nm (média do período)
Umidade Relativa Externa	65°C (média do período)
Temperatura Externa	22°C (média do período)
Temperatura da folha	Temp Ar Interno – 5°C
Temperatura do Solo	22,5°C

A tabela 13 foi composta com os resultados obtidos pelo sistema a partir de suas avaliações e suas respectivas ações de controle e a tabela 14 traz um registro das ações tomadas pelo controle já existente na estrutura.

Tabela 13 – Análise de clima e ações de controle – modelo computacional (dia 1)

DIA 01	Temp Interna	Umid Interna	DPV	Cortina H	Exaustor	Ventilador	Pad/Nebulizador	RadG	Céu
08:00	IDEAL	ALTA	BAIXO	Desativar	Ativar	Ativar	Nula	68,4	Limpo
09:00	IDEAL	ALTA	BAIXO	Desativar	Ativar	Ativar	Nula	68,4	Limpo
10:00	IDEAL	ALTA	IDEAL	Nula	Ativar	Ativar	Nula	56,8	Limpo
11:00	POUCO ALTA	ALTA	IDEAL	Nula	Ativar	Ativar	Nula	66,4	Limpo
12:00	ALTA	ALTA	BAIXO	Desativar	Ligar	Nula	Nula	428	Limpo
13:00	ALTA	POUCO BAIXA	IDEAL	Ativar	Nula	Nula	Ativar	130	Limpo
14:00	ALTA	MUITO ALTA	IDEAL	Ativar	Nula	Ativar	Nula	197,2	Limpo
15:00	ALTA	IDEAL	IDEAL	Ativar	Nula	Nula	Ativar	272,8	Limpo
16:00	ALTA	MUITO ALTA	IDEAL	Ativar	Nula	Ativar	Nula	119,2	Nublado
17:00	ALTA	MUITO ALTA	IDEAL	Ativar	Nula	Ativar	Nula	119,2	Nublado
18:00	POUCO ALTA	ALTA	IDEAL	Desativar	Nula	Ativar	Nula	31,6	Nublado

Tabela 14 – Análise de clima e ações de controle – controles existentes (dia 1)

DIA 01	Temp Interna	Umid Interna	DPV	Cortina H	Exaustor	Ventilador	Pad/Nebulizador	RadG	Céu
08:00	IDEAL	ALTA	BAIXO	Desativar	Nula	Nula	Nula	68,4	Limpo
09:00	IDEAL	ALTA	BAIXO	Desativar	Nula	Nula	Nula	68,4	Limpo
10:00	IDEAL	ALTA	IDEAL	Desativar	Nula	Nula	Nula	56,8	Limpo
11:00	POUCO ALTA	ALTA	IDEAL	Desativar	Nula	Nula	Nula	66,4	Limpo
12:00	ALTA	ALTA	BAIXO	Ativar	Nula	Ativar	Nula	428	Limpo
13:00	ALTA	POUCO BAIXA	IDEAL	Ativar	Nula	Ativar	Nula	130	Limpo
14:00	ALTA	MUITO ALTA	IDEAL	Ativar	Nula	Ativar	Nula	197,2	Limpo
15:00	ALTA	IDEAL	IDEAL	Ativar	Nula	Ativar	Nula	272,8	Limpo
16:00	ALTA	MUITO ALTA	IDEAL	Desativar	Nula	Ativar	Nula	119,2	Nublado
17:00	ALTA	MUITO ALTA	IDEAL	Desativar	Nula	Ativar	Nula	119,2	Nublado
18:00	POUCO ALTA	ALTA	IDEAL	Desativar	Nula	Nula	Nula	31,6	Nublado

Nestas tabelas, foram feitas relações entre os dados de Temperatura e Umidade Relativa do ar interno, Déficit de Pressão de Vapor, Radiação Solar. No caso dos Dados Meteorológicos, este foi utilizado para justificar a redução ou aumento da Radiação Solar. Comparando-se as tabelas 13 e 14, notam-se algumas divergências nas ações de controle, em geral podemos ver que há muitas ações em comuns em ambos, excetuando-se pelo fato de que o modelo leva em consideração o DPV como forma de mensurar o estado da planta naquele momento.

Nas tabelas 13 e 14 aparecem algumas ocorrências no período de 08:00h as 09:00h da manhã, têm-se céu limpo e baixos índices de radiação solar; segundo a avaliação do modelo computacional, a temperatura foi classificada como IDEAL, a umidade relativa classificada como ALTA e o DPV como BAIXA.

De acordo com a base de regras estabelecida o parâmetro DPV prevalece sobre todos os outros, pois influencia diretamente as funções fisiológicas da planta. Pela a literatura (Angelocci, 2002; Leal 2000, Boily 1999), esta avaliação caracteriza o fechamento dos estômatos da planta, o que ocasiona a paralização das funções de fotossíntese afetando seu crescimento.

Portanto, o sistema recomenda o desligamento das cortinas horizontais e uso do exaustor ou ventilador, dependendo do que estiver instalado, a fim de proporcionar uma rápida troca de ar interno, com conseqüente com redução da umidade relativa. O sistema existente realizou uma ação semelhante, com exceção da ativação do exaustor o que ocasionaria um taxa mais lenta de redução da umidade e elevação dos índices de DPV ao intervalo IDEAL.

Outro fator interessante e passível de comentários no dia 1 foi a falha ocorrida na ação de controle. Na faixa destacada das 12:00h o fato do parâmetro DPV prevalecer sobre os outros parâmetros, fez com que as cortinas fossem desativadas sob alta incidência de

radiação solar e elevadas temperaturas. Este fator foi corrigido no modelo final, entretanto os resultados foram mantidos como forma de ilustrar e alertar sobre situações inusitadas que podem gerar regras conflitantes, as quais podem ocasionar efeitos indesejados no ambiente interno.

No registro relativo as 13:00h, o sistema convencional recomendou o uso de ventiladores, porque o “set point” estava configurado para que este equipamento fosse acionado com temperaturas acima de 25°C (ALTA), sem levar em consideração, que, havia indícios de umidade baixa. Já o modelo computacional recomenda o uso de pad/nebulizador, que acarretaria em maior eficácia no aumento da umidade e redução de temperatura. Entretanto, ambos coincidiram no uso da cortina horizontal.

Às 15:00h, o modelo computacional recomenda que o pad/nebulizador fosse utilizado novamente, uma vez que a temperatura registrada era ALTA, bem como índices de ganhos de calor. Já o sistema convencional recomendou o uso de ventilador devido a temperatura, mas isso acarretaria redução da umidade, o que seria indesejável, já que este se encontrava na faixa IDEAL.

Nas ocorrências finais das medições diárias, período entre 16:00h e 17:00h pode-se notar outra divergência de ações, quando o sistema convencional desativa as cortinas horizontais (baixa radiação) e mantém ligado o ventilador (altas temperaturas). O modelo recomenda que os ventiladores permaneçam ligados (alta umidade) e que as cortinas sejam ativadas, já que os cálculos de carga térmica (Calor de Radiação) indicam que ainda há ganhos de calor por radiação; fato este comprovado pelos índices de radiação e também altas temperaturas internas.

VI – CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com a avaliação do complemento de iluminação das estruturas estudadas mostram que o produtor utilizava inadequadamente os equipamentos de controle, tanto os manuais como os automáticos. Neste caso específico, o produtor não os configurava adequadamente, permitindo que o tempo de iluminação permanecesse inalterado independentemente da época do ano, pois é de conhecimento que a alteração de ângulo solar influi no fotoperíodo, provocando o uso de iluminação artificial. Nas simulações foi possível obter dados que visivelmente demonstram menor consumo de energia, evidentemente se outros fatores (relevo e sombreamento) forem levados em consideração esses índices seriam menores.

Nas comparações feitas entre o modelo computacional e os meios de controle existentes, notou-se que os resultados foram compatíveis em muitas das ocorrências. Entretanto, muitas análises realizadas nos dados demonstraram que algumas ações de controle com função corretiva geraram também resultados insatisfatórios, no caso do controle existente. Isso se deve em grande parte devido à sua incapacidade de levar em consideração diversos fatores em conjunto, as ocorrências registradas do dia 1 demonstram isso claramente.

A respeito do desenvolvimento de um controle climático, é importante ressaltar que há um grande número de fatores externos e internos a casa de vegetação, interferindo e variando constantemente e alguns fatores prioritários podem gerar conflitos entre si, como o demonstrado na ocorrência das 12:00 do dia 1. Diante disto, há necessidade de imprimir cautela na modelagem de um provável equipamento de controle. Deve ser destacado que o tempo entre as ações de controle e o resultado obtido deve ser observado, uma vez que existe a possibilidade de que sucessivos resultados indesejáveis ocorram.

Muitos equipamentos devido a sua forma de funcionamento impedem que seja aplicada a lógica “fuzzy” a fim de regulá-la em estágios intermediários (50% de extensão de uma cortina horizontal, por exemplo), onde certamente ocasionaria efeitos indesejáveis.

Com relação ao nível tecnológico foi possível constatar que existe uma necessidade mínima de sensores para efetuação dos cálculos básicos de avaliação de clima; no caso temperatura, umidade, radiação solar e temperatura de solo, pois caso contrário, o uso das médias locais torna a avaliação muito subjetiva e não reflete o estado real da estrutura.

Evidentemente que o projeto cria possibilidades para continuidade e aperfeiçoamento, uma vez que todas as suas possibilidades não foram exploradas completamente. Um exemplo seria agregar novas rotinas a base de conhecimento tais como ações de controle de vários equipamentos ao mesmo tempo. Isso seria de grande inovação e permitiria que o modelo atuasse com maior precisão quando comparado aos sistemas convencionais e com possíveis resultados a curto período de tempo.

VIII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, **Handbook of applications**, ASHRAE, Atlanta, Geórgia, 1978.

ASAE, **Handbook of fundamentals**, ASAE, Atlanta, Geórgia, 1978.

ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas com a atmosfera**, IAC, Campinas, 2002, 272p.

ABRIGHT, L.D. **Environment Control for Animals and Plants**. St.Joseph: ASAE, 1990, 453p.

_____. **Controlling Greenhouse Environments**. In: **Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses**. Acta Horticulturae, n°.578, p.47-54, 2002.

AZEVEDO, J.A.; SILVA, E. M. **Tensiômetro: Dispositivo prático para controle da Irrigação, Embrapa Cerrados - Circular Técnica**, Planaltina: EMBRAPA. 1999, 39p.

BAKKER, J.C. **Greenhouse Climate Control: Constraints and Limitations**. Acta Horticulturae, n°.399, p.25-35, 1995.

BARBOSA, J.G.; MARTINEZ, H.F.P. **O cultivo hidropônico do crisântemo**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Conselho Técnico de Extensão, 1995, 8p.

BLISKA Jr, A.; HONÓRIO, S.L. **Cartilha Tecnológica de Plasticultura e Estufa**, Ed. 2º, Unicamp., Campinas, SP. 2000.

BOILY, R. **Estufa: Controle do meio ambiente**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999 (Apostila).

CANTÃO, L.A. **Programação Não-Linear com Parâmetros “Fuzzy”:** Teoria e Algoritmos – Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de Estadual de Campinas – FEEC/Unicamp, Campinas, 2003, 89p.

CANSADO, J.C. **AGRILOGIC: Sistema para experimentação de controle climático em casas de vegetação – Dissertação (Mestrado)**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI/USP, São Paulo, 2003, 111p.

CARR, J.J. **Interfacing your microcomputer to virtually anything.** Tab books, Inc., Blue Ridge Summit, PA. 325p. apud HANAN, Joe. J. Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture. Flórida: CRC PRESS, 1997, 684p.

CIOKOLSZ, D.E.; ALBRIGHT, L.D.; SAGER, J.C.; LANGHANS, R.W. **A Model for Plant Lighting System Selection**, Transactions of ASAE, v.45(1), p.215-221, 2002.

CUNHA, J.B.; COUTO, C; RUANO, A.E.B. **A Greenhouse Climate Multivariable Predictive Controller.** In: Proceedings of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques Towards the 3rd Millenium. Acta Horticulturae, nº.534, p.269-276, 2000.

CRUZ, L.F. **Modelo “Fuzzy” para Obtenção do Tempo de Aeração em Silos Verticais Visando Reduzir o Consumo de Energia Elétrica – Tese (Doutorado)**, Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade do Estadual Paulista - UNESP, Botucatu, 2001, 102p.

CRUZ, L.F. **Sistematizações da Teoria Fuzzy – Dissertação (Mestrado)**, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade do Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro, 1996, 72p.

DOGRA, A.K.; CHANDRA, P. **Development of an Intelligent Controller for a Greenhouse Management**. In: Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. Acta Horticulturae, n°.578, p.377-382, 2002.

_____. **A Decision Support System for the Management of Greenhouse Environment**. In: Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. Acta Horticulturae, n°.578, p.383-388, 2002.

DOWNS, R. J. HELLMERS, H. **Environment and the Experimental Control of Plant Growth**. New York: ACADEMIC PRESS, 1975, 147p.

FEITOSA, H. A. **Princípios Fundamentais da Teoria Fuzzy – Dissertação (Mestrado)**, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade do Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro, 1992, 89p.

FONTES, I.R. **Sistema de Supervisão e Controle de Irrigação Utilizando Técnicas de Inteligência Artificial Visando o Uso Racional de Energia – Dissertação (Doutorado)**, Faculdade de Ciências Agrônomicas - Universidade do Estadual Paulista - UNESP, Botucatu, 2003, 206p.

FURLAN, R.A. **Avaliação da Nebulização e Abertura de Cortinas na Redução da Temperatura do Ar em Ambiente Protegido – Dissertação (Doutorado)**, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, Piracicaba, 2002, 160p.

GAO, X.; HE, Y. **The study of single board microcomputer control system in multi-function greenhouse and its attached equipment**, disponível em <http://www.asae.org>, 25/02/2003.

GIACOMELLI, A.G. **Nutrient Delivery Systems for Crop Production in the Controlled Environment.** In: Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. Acta Horticulturae, n°.578, p.207-212, 2002.

GUISELINI, C.; **Microclima e Produção de Gérbera em Ambientes Protegidos com Diferentes tipos de Cobertura - Dissertação (Mestrado),** Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, Piracicaba, 2002, 71p.

HANAN, Joe. J. **Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture.** Flórida: CRC PRESS, 1997, 684p.

HOFFMANN, S; WAAIJENBERG, D. **Tropical and Subtropical Greenhouses – A challenge for New Plastic Films.** In: Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. Acta Horticulturae, n°.578, p.163-169, 2002.

ISMAIL, K. A. R., GONÇALVES, M. M., BENEVENUTO, F. J. **Instrumentação Básica para Engenharia.** Campinas, SP. Ed. do autor, 1998. 470p.

JONES, J.W.; HWANG, Y.K.; SEGNER, I. **Simulation of Greenhouse, Environments and Control Systems.** Acta Horticulturae, n°.399, p.73-84, 1995.

JONES, H.G. **Plants and Microclimate.** 2o Ed., Cambridge University Press 2ª. Ed, 1992, 428p.

KITTAS, C.; BARTZANAS, T.; JAFFRIN, A. **Greenhouse Evaporative Cooling: Measurement and Data Analysis,** Transactions of ASAE, v.44(3), p.683-689, 2001.

LEAL, P.M. **Carga de Aquecimento e Resfriamento em Estruturas.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358/cargadeaquecimentoresfriamento.doc>.

Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Respostas Fisiológicas aos Fatores Climáticos.**

]<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358/FisioVeg.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Psicrometria.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358/psicrometria.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Radiação solar.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358/radiacaosolar.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Transferência de Calor em Estruturas.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358/transferenciadecalor.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Controles, Equipamentos e Manutenção.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358fa873/controles.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Ventilação Mecânica.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358fa873/ventilacaomecanica.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

_____. **Ventilação Natural.**

<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/ap358fa873/ventilacaonatural.doc>. Acesso em: 12 Agosto 2004.

MCCORMACK, A.C., RUMMEL, J.D. **A Survey of current control approaches for plant growth systems used in life support systems.** SAE International – ICES Paper n° 932280, 1993. apud FLEISHER, D.H. Preliminary Analysis of Plant Response to Environmental Disturbances in Controlled Environments, disponível em <http://www.asae.org>, paper n° 024076 ,25/02/2003.

MONTERO, J.I.; ANTÓN, A. **Greenhouse cooling during warm periods,** Acta Horticulturae, v. 357, p.49-61, 1994.

MORAES, R.; CUNHA, J.B. **Agritronics: A Distributed Data Acquisition and Control Network for Agriculture Environments.** In: Proceedings of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques Towards the 3rd Millenium Acta Horticulturae, n°.534, p.319-325, 2000.

ODHIAMBO, L.O.; YODER, R.E.; YODER, D.C. **Estimation of Reference Crop Evapotranspiration using “Fuzzy” State Models,** Transactions of ASAE, v.44(3), p.543-550, 2001.

ROCHA, P.K. **Desenvolvimento de Bromélias em Ambientes Protegidos com Diferentes Alturas e Níveis de Sombreamento – Dissertação (Mestrado),** Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, Piracicaba, 2002, 111p.

YAGER, R.; OVCHINNOIKOV, S.; TONG, R., NGUYEN, H. (eds.), **“Fuzzy” Sets and Applications.** Selected papers by L. A Zadeh, John Wiley, New York, 1987.

WANG, D.C.; FANG, W.; FON, D. **Development of a Digital Psychrometric Calculator using MATLAB.** In: Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. Acta Horticulturae, n°.578, p.339-344, 2002.

ZADEH, Z. A. **Fuzzy Sets and Applications**, New York, John Wiley, 1987, 684p.