

Simulação do comportamento térmico de estufas agrícolas com cobertura plástica

Jorge Luiz Ferreira

Resumo da dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, defendida e aprovada em 28 de junho de 2002.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Área de Concentração: Energia. Orientador: Prof. Dr. Paulo S. Schneider

SIMULATION OF THE THERMAL BEHAVIOR OF AGRICULTURAL GREENHOUSES WITH PLASTIC COVERING

Abstract

This work is a resume of the dissertation of same title [Ferreira (2002)]. The aim is to model the thermal behavior of an agricultural greenhouse, with an approximative area of 1500 m² and with low density polyethylene plastic covering.

The equations adopted in this modelling give more importance to the description of the radiant phenomena, that are treated in a more detailed way, if compared to the phenomena of heat transfer by convection and conduction.

The model is able to simulate the greenhouse's internal ambient air temperature, from outside data, like the temperature of the air and the incident solar radiation.

The results obtained by the simulation are compared to experimental data, collected along a research project developed in greenhouses for roses production, in the mountain region of Rio Grande do Sul State - Brazil.

A good approach level is verified by the simulation when comparing to measured values. Finally, it's concluded that the model follows the real phenomena, although it requires improvements and consistences.

Key Words: energy, greenhouse, thermal behavior

Introdução

O estudo do comportamento climático das estufas com cobertura de polietileno tem sido objeto de inúmeras pesquisas e investimentos, buscando melhorar seus índices de produtividade, reduzir perdas, custos de produção e diminuir o período entre safras. Em vários estudos, a busca da otimização dos processos energéticos envolvidos e o controle de condições biológicas e climáticas recebem o foco das atenções.

Além da proteção contra as intempéries danosas às culturas (geadas, granizo, vendavais, etc.), o aporte de calor no interior da estufa através da energia solar vem a ser uma solução para a climatização do ambiente cultivado, sem impacto ambiental e, dependendo da sofisticação, de baixo custo.

Por iniciativa conjunta com a Associação dos Produtores de Rosa da Serra Gaúcha, o Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), da UFRGS, a partir de 1997 vem desenvolvendo várias pesquisas visando soluções para o problema de congelamento de roseiras cultivadas em estufas, decorrente das frequentes geadas que se formam na região, no período de inverno.

Complementando as pesquisas e os dados experimentais obtidos, o presente trabalho foi motivado pela necessidade de se chegar num modelo do comportamento térmico dos ambientes estudados, privilegiando os fenômenos radiantes, desenvolvendo a modelagem dos fenômenos físicos presentes e uma rotina computacional que os represente e permita simulá-los. O grande conjunto de dados obtidos servem, ainda, para a validação do modelo.

No início da pesquisa, o programa que pareceu mais apropriado para a tarefa foi o TRNSYS.15 (Transient System Simulation Program, versão 15, ano 2000), originário do Laboratório de Energia Solar (SEL) da Universidade de Wisconsin, nos Estados Unidos, o qual, na versão atual, também é capaz de simular o comportamento térmico de edificações. As rotinas computacionais disponíveis no TRNSYS destinadas a simulações "monozona" e "multizona" apresentaram algumas limitações que inviabilizaram seu emprego. A impossibilidade de simular

corretamente o material utilizado na cobertura da estufa (polietileno com 0,0001 m de espessura) e tratamento não diferenciado das radiações térmicas em ondas longas e curtas. Após algumas semanas de investigação, concluiu-se que tais problemas somente poderiam ser resolvidos com alterações nas rotinas fontes, o que naquela ocasião não foi possível.

Diante deste fato, optou-se pelo desenvolvimento de uma rotina própria, adotando-se o programa MatLab [Hanselman et al. (1999)], combinado com algumas rotinas auxiliares do TRNSYS, para processamento da radiação térmica.

A seguir, uma revisão bibliográfica das principais publicações relacionadas com estufas de plasticultura, com especial ênfase à abordagem dada por cada autor a modelagem física e ao equacionamento relativo ao balanço de energia.

Posteriormente, desenvolve-se o modelo físico, aplicando as equações de balanço de energia e a respectiva rotina computacional. As simulações e ajustes são efetuados com base em dados climáticos de Porto Alegre, para comportamentos típicos de inverno e de verão.

Finalmente, a partir dos dados obtidos experimentalmente, uma simulação torna possível comparar e analisar os resultados reais com os valores calculados pela rotina computacional, propondo alternativas para melhorias futuras na própria rotina, na modelagem física e nas medições aplicadas ao modelo real.

Revisão Bibliográfica

Dentre as publicações pesquisadas que tratam detalhadamente a modelagem e equacionamento do balanço de energia, aplicável às estufas com cobertura de polietileno, observam-se formas diferentes de abordagem e modelos, dos quais os que mais contribuíram para este trabalho são apresentados a seguir.

O modelo de Garzoli et al. (1981) desenvolve um equacionamento com finalidade específica, ou seja, a análise das perdas noturnas na estufa com cobertura de polietileno, conforme visualizado na figura 2.1.

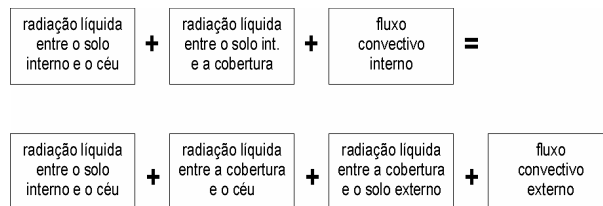


Fig. 2.1 – Representação gráfica do modelo de Garzoli et al. (1981)

O trabalho de Schneider (1994) foi desenvolvido para ambientes e edificações genéricas. O modelo apresentado, na figura 2.2, envolve 3 níveis de balanços de energia, iniciando pelo volume da zona interna e passando pelos balanços das superfícies internas e externas. Os balanços são agrupados em função das variáveis de acoplamento. Após algumas adaptações específicas, principalmente no que se refere às perdas noturnas e trocas externas modeladas por Garzoli et al. (1981), este constituiu-se na base do modelo aplicável ao presente trabalho.

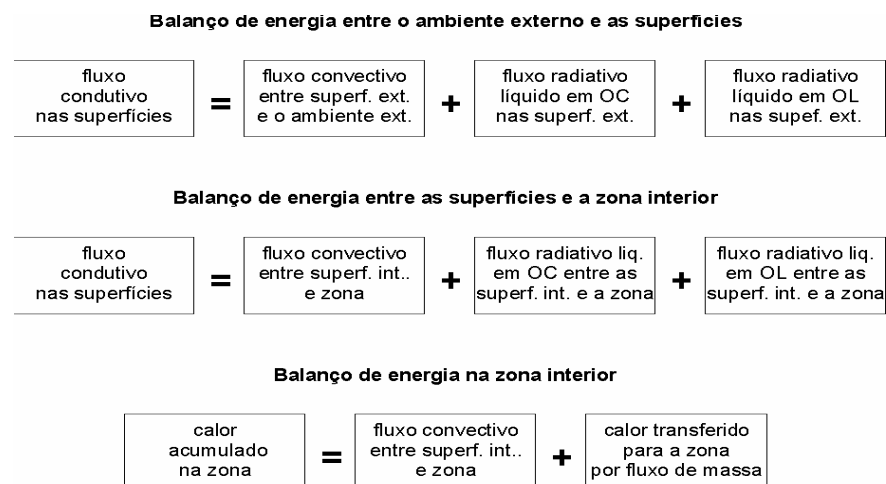


Fig. 2.2 – Diagrama representativo do modelo de Schneider (1994).

Ao abordar a acumulação térmica, principalmente em relação ao fluxo condutivo de calor pelo solo, Gonzales-Real (1996) cita que tal fluxo pode ser considerado como se operasse em regime permanente, visto que a resposta do solo às variações térmicas externas são lentas, mesmo em dias cuja amplitude térmica é relevante. Também afirma que a influência do fluxo térmico condutivo no solo interno da estufa esgota-se a profundidades da ordem de 0,15 m, quando não houver sistema de calefação de solo. O que permite deduzir que as perdas térmicas para o solo são pequenas (da ordem de 10 a 20 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$) quando comparadas com os demais fluxos energéticos do sistema. Quanto ao comportamento do fluxo térmico devido à evapotranspiração da cobertura vegetal, aplica a metodologia baseada no coeficiente de Bowen relativo à espécie cultivada.

A Modelagem Física

Adotando-se os estudos de Schneider (1994), juntamente com as perdas noturnas definidas por Garzoli et al. (1981) e as afirmações de Gonzales-Real (1996), a modelagem da estufa foi desenvolvida considerando três sub-sistemas (zona interna, superfícies internas e superfícies externas) e suas respectivas equações gerais de balanço de energia. O objetivo final é determinar a temperatura do ar na zona interna à estufa, a partir do conhecimento da temperatura do ar no ambiente externo e da radiação solar incidente.

A modelagem física está baseada nas seguintes hipóteses gerais de simplificação:

- a temperatura do ar no ambiente interno da estufa é considerada como uniforme, constituindo uma única zona térmica, ou monozona;
- as propriedades térmicas do ar, do solo e dos demais materiais são tomadas como constantes;
- desprezam-se fatores como a influência da umidade relativa do ar, da ocorrência de condensação nas superfícies internas e externas da estufa, assim como da velocidade do vento nas superfícies externas;
- a modelagem considera como variáveis de entrada os fluxos de radiação térmica em ondas longas e curtas, incidentes nas superfícies horizontais e verticais da estufa, assim como a temperatura do ar do ambiente exterior à estufa;
- despreza-se a influência da camada vegetal no comportamento térmico do interior da estufa [Frisina et al. (1998)];
- a condução do calor no filme de plástico da cobertura é tomada como sendo em regime permanente, devido a sua pequena espessura (da ordem de 0,1 mm);
- a condução do calor no solo é tomada como sendo em regime permanente;
- para a radiação térmica em ondas longas, conforme a Lei de Kirschhof, a emissividade (ϵ) será considerada igual a absorvidade (α) e para a faixa de temperatura em que opera o modelo (da ordem de 300 K) não haverá emissão de radiação em ondas curtas pelas superfícies internas e externas;
- desconsidera-se radiação de ondas longas de origem externa incidente na zona interna.

Como convenção, consideraram-se positivos os fluxos de energia que entram no sistema estufa. Consideradas as hipóteses adotadas para o balanço de energia, a figura 3.1 abaixo apresenta os fluxos térmicos presentes numa edificação tipo estufa, com cobertura de material plástico semi-transparente.

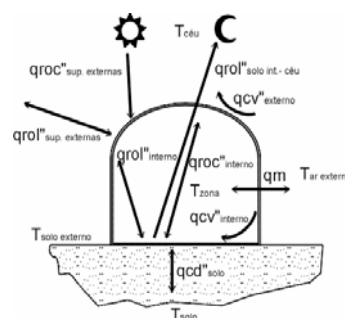


Fig. 3.1 – Diagrama representativo dos fluxos térmicos na estufa.

Onde:

qcd_{solo}''	fluxo de calor condutivo no solo interno da estufa [$W.m^{-2}$]
$qcv_{externo}''$	fluxo de calor convectivo nas superfícies externas [$W.m^{-2}$]
$qcv_{interno}''$	fluxo de calor convectivo nas superfícies internas [$W.m^{-2}$]
qm	taxa de troca de calor por transferência de massa de ar [W]
$qroc_{interno}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas trocado entre as superfícies internas [$W.m^{-2}$]
$qroc_{sup.externas}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas nas superfícies externas [$W.m^{-2}$]
$qrol_{interno}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas trocado entre as superfícies internas [$W.m^{-2}$]
$qrol_{solo-int-céu}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas longas entre o solo interno e o céu [$W.m^{-2}$]
$qrol_{sup.externas}''$	fluxo de calor radiante em ondas longas nas superfícies externas [$W.m^{-2}$]
$T_{arexterno}$	temperatura do ar externo [K]
T_{ceu}	temperatura da abóbada celeste [K]
T_{solo}	temperatura do solo (a uma determinada profundidade) [K]
$T_{soloexterno}$	temperatura da superfície do solo na área externa à estufa [K]
T_{zona}	temperatura do ar na zona interna da estufa [K]

Para efeito de equacionamento do balanço de energia, os fluxos térmicos externos e internos podem ser desacoplados em 3 subsistemas. A figura 3.2 apresenta os fluxos térmicos na zona interna.

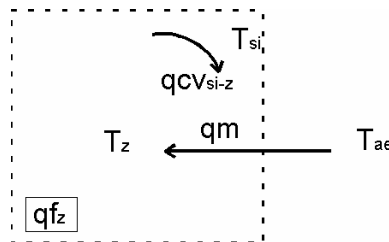


Fig. 3.2 – Diagrama representativo dos fluxos térmicos na zona interna.

Onde a equação geral do balanço de energia é definida como:

$$qac_z = qcv_{si-z} + qm + qf_z \quad (3.1)$$

Para:

qac_z	taxa de calor acumulado na zona [W]
qcv_{si-z}	taxa de calor transferida para zona por convecção [W]
qcv_{si-z}''	fluxo de calor convectivo entre as sup. internas e a zona [$W.m^{-2}$]
qf_z	taxa de calor fornecido para a zona [W]
T_{ae}	temperatura do ambiente externo [K]

T_{si} temperatura das superfícies internas [K]
 T_z temperatura da zona [K]

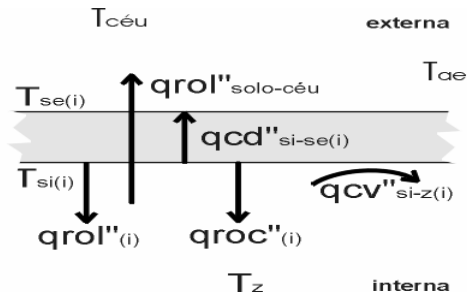


Fig. 3.3 – Representação gráfica do balanço de energia entre as superfícies internas e a zona. Para o balanço de energia entre as superfícies internas e a zona, o diagrama representativo das trocas térmicas estão apresentados na figura 3.3, assim como, na seqüência, o equacionamento adotado.

$$qcd''_{si-se(i)} = qcv''_{si-z(i)} + qrol''_i + qroc''_i - qrol''_{solo-céu} \quad (3.2)$$

Quando:

qcd''_{si-se} fluxo de calor condutivo entre as sup. internas e externas [$W.m^{-2}$]
 $qrol''_i$ fluxo radiante líquido para ondas longas por superfície [$W.m^{-2}$]
 $qroc''_i$ fluxo radiante líquido para ondas curtas por superfície [$W.m^{-2}$]
 $qrol''_{solo-céu}$ fluxo de calor radiante líquido para ondas longas entre o solo e o céu [$W.m^{-2}$]
 Tse temperaturas das superfícies externas [K]

A figura 3.4 apresenta o diagrama do balanço de energia das superfícies externas. Segue-se o respectivo equacionamento.

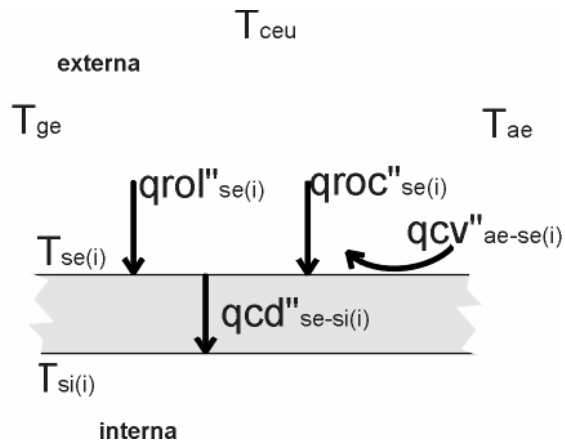


Fig. 3.4 - Diagrama do balanço de energia para as superfícies externas

O balanço de energia é representado pela seguinte expressão:

$$qcd''_{se-si(i)} = qcv''_{ae-se(i)} + qrol''_{se(i)} + qroc''_{se(i)} \quad (3.3)$$

Onde:

$qcd_{se-si(i)}''$	fluxo de calor condutivo entre as sup. externas e internas [$W.m^{-2}$]
qcv_{ae-se}''	fluxo de calor convectivo para as sup. externas [$W.m^{-2}$]
$qroc_{se(i)}''$	fluxo de calor radiante líquido externo para ondas curtas por superfície [$W.m^{-2}$]
$qrol_{se(i)}''$	fluxo de calor radiante líquido para ondas longas por superfície [$W.m^{-2}$]

No desenvolvimento matemático completo promovido pelo autor [Ferreira (2002)], onde os termos genéricos das equações 3.1, 3.2 e 3.3 são trabalhados algebricamente e, na seqüência, são atribuídos formatos matriciais, constata-se que:

- na equação 3.1, Tz é função de Tsi ;
- na equação 3.2, Tsi é função de Tz e de Tse ;
- na equação 3.3, Tse é função de Tsi .

Portanto, com o acoplamento destas 3 equações por um processo iterativo foi possível chegar-se a solução desejada. Ou seja, a determinação de Tz tendo como variáveis de entrada o valor das componentes difusa e direta da radiação térmica em ondas curtas e o valor da temperatura do ar no ambiente externo.

Desenvolvimento da Rotina Computacional

Com base no modelo físico apresentado anteriormente, desenvolveu-se uma rotina computacional utilizando o software MatLab Student 5.3 [Hanselman et al. (1999)]. Para testar a rotina computacional, utilizaram-se dados meteorológicos horários relativos à cidade de Porto Alegre, juntamente com os processadores de radiação solar do programa TRNSYS.15, em situações de condição de tempo típicas de inverno e de verão.

A rotina tem como objetivo principal a solução das equações 3.2, 3.4 e 3.8, pelo método iterativo de Gauss-Seidel, e compõe-se dos seguintes módulos:

- atribuição de valores para as grandezas, parâmetros iniciais, vetores e matrizes;
- montagem das matrizes e vetores fixos utilizados nas equações de balanço de energia;
- leitura de dados horários de temperatura externa, celeste e de radiação direta e difusa incidentes nas diversas superfícies da estufa;
- cálculo das temperaturas das superfícies externas, internas e da zona e rotinas de verificação de erro por convergência de temperatura e por resíduo de equação de balanço na zona;
- graficação dos resultados.

A partir das hipóteses adotadas na modelagem física, definiu-se parâmetros de entrada para as propriedades físicas do material plástico da cobertura (polietileno de baixa densidade), do solo interno, do ar na temperatura de 300 K e os coeficientes de transferência de calor por convecção internos e externos.

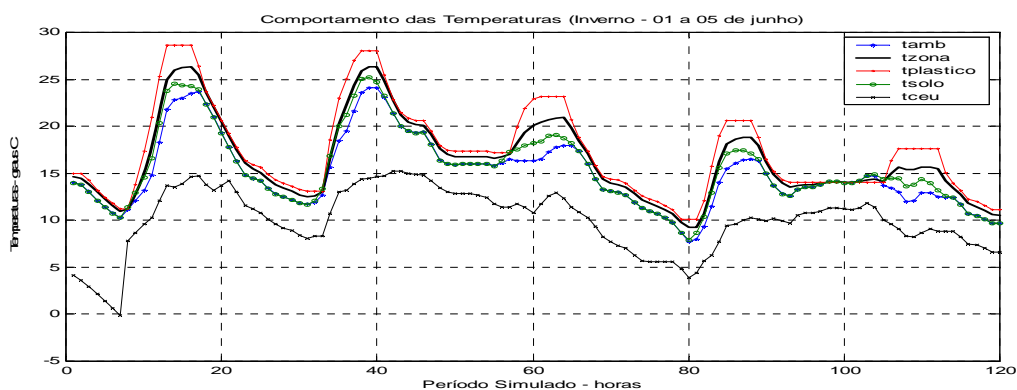


Fig. 4.1 - Simulação da temperatura do ar na zona (tzona) e da temperatura do ar no ambiente externo (tamb) para dados relativo ao período de 01 a 05 de junho, demonstrando as temperaturas da abóbada celeste (tceu), da superfície interna da cobertura horizontal (tplastico) e da superfície do solo interno da estufa (tsolo).

Utilizou-se também, rotinas computacionais no TRNSYS.15 para processamento do arquivo climático tipo TRY, relativo à cidade de Porto Alegre, possibilitando o cálculo dos valores de radiação solar, direta e difusa, incidentes nas superfícies com orientação geográfica Norte, Sul, Leste e Oeste, e da temperatura celeste, todas referentes ao período simulado. Com rotina do aplicativo EXCEL, foram determinados os valores dos Fatores de Forma internos.

Uma das simulações efetuadas, utilizando dados do período de 1 a 5 de junho é apresentada na figura 4.1.

Os resultados obtidos com esta e outras simulações indicam um comportamento térmico esperado e compatível para estufas com cobertura plástica. Na presença de radiação solar, apresenta acréscimos de temperatura do ar na zona, relativamente à temperatura do ar externo. Nos períodos noturnos os valores de ambas temperaturas aproximam-se. Tal perfil de comportamento permite considerar que o modelo físico adotado pode representar a influência que a condução, a convecção e a radiação térmica em ondas curtas e longas provocam em edificações deste tipo.

O modelo escolhido representa os efeitos térmicos da radiação solar, assim como as perdas noturnas em ondas longas, tanto das coberturas plásticas, como do solo interior para o céu. Da mesma forma, quando foi aplicado testes de sensibilidade para vários parâmetros (transmissividade em ondas longas, temperatura celeste e coeficientes de transferência de calor convectivo interno e externo), as respostas obtidas permitem concluir que os dados que exigem maior acuracidade são aqueles relativos à transmissividade em ondas longas do plástico e à temperatura celeste.

Portanto, a coerência dos resultados permitiu concluir que a rotina computacional desenvolvida com base nesse modelo físico, pode ser empregada para simulação com dados reais.

Simulação com dados experimentais

Os dados experimentais empregados nesse trabalho foram obtidos ao longo do ano de 2000, em uma estufa de cerca de 1500 m², montado em um sítio na cidade de Ipê, Rio Grande do Sul. Sua cobertura é em arco e suas laterais têm janelas ao longo de toda a extensão, que são abertas de baixo para cima por enrolamento do plástico. O croquis dimensional da estufa, bem como a orientação geográfica de suas superfícies estão representados na figura 5.1.

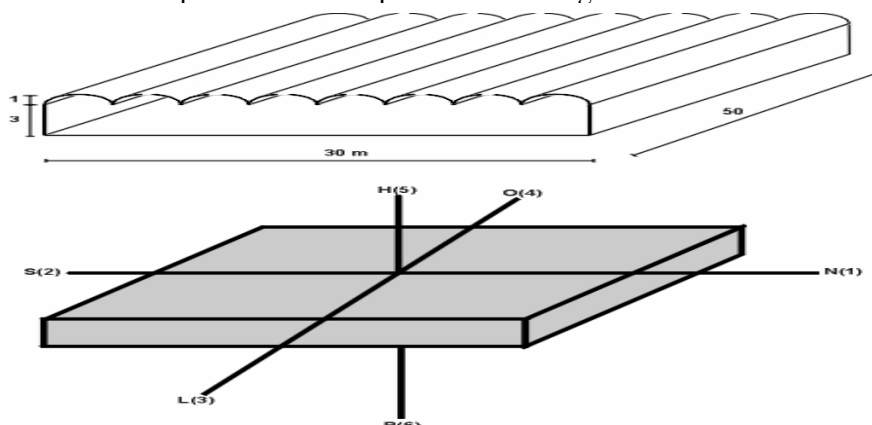


Fig. 5.1 – Dimensões e orientação geográfica das superfícies da estufa.

De acordo com os objetivos propostos na medição de radiação solar na região das estufas, a base de leitura foi constituída por dois piranômetros: um deles foi exposto totalmente ao sol, recebendo a radiação total hemisférica. O outro recebeu somente a radiação difusa, ou seja, a luz solar difundida na atmosfera e a refletida pelas nuvens.

Além dos Piranômetros, para as leituras do ambiente externo foi montada uma Estação

Meteorológica capaz de fornecer dados de temperatura e umidade. Para a leitura das temperaturas do ambiente interno, foram posicionados sensores nas cotas 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m e 4 m de altura, sendo que, neste trabalho, devido ao fato da hipótese adotar um sistema com comportamento tipo "monozona", consideraram-se as leituras efetuadas pelo sensor da cota 1,5 m. Uma observação geral nos dados obtidos não encontrou diferenças expressivas entre as leituras efetuadas pelos demais sensores internos.

A partir dos dados experimentais de radiação disponíveis para o plano horizontal, para obter-se as componentes direta e difusa de radiação, relativo às superfícies orientadas da estufa, utilizou-se um aplicativo do TRNSYS.15. Para efeito dos cálculos do processador de radiação, considerou-se a latitude do município de Ipê equivalente a -30° .

Após a análise de prováveis comportamento meteorológicos para as seqüências de dias das simulações, aplicou-se tais dados como entradas na rotina computacional.

Na figura 5.2 é apresentado o gráfico comparativo entre as temperaturas do ar do ambiente externo (tamb) e da zona (tzonamed), ambas medidas e as temperaturas da zona (tzona) calculadas pela rotina computacional relativas ao período de 09 a 13 de julho.

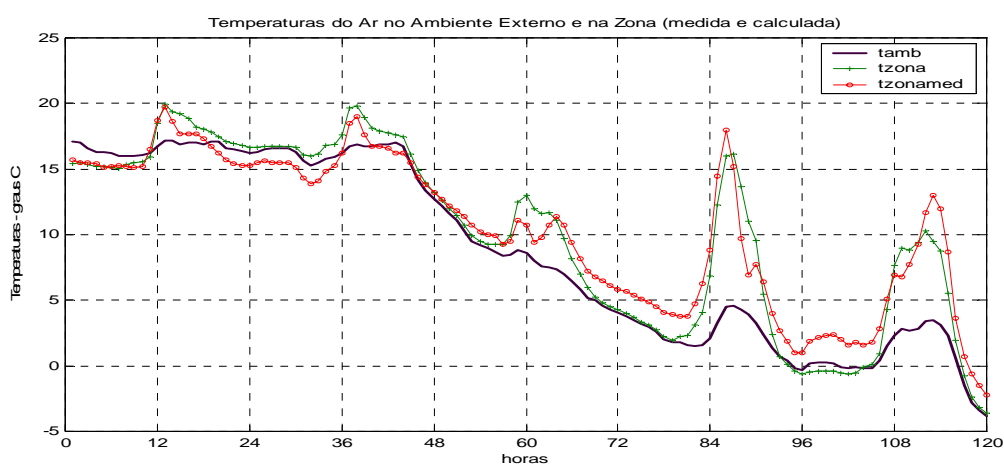


Fig. 5.2 – Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed) e simulada pela rotina computacional (tzona), relativas ao período de 9 a 13 de julho.

A análise comparativa, entre os valores medidos e simulados para a temperatura do ar na zona, permite as seguintes conclusões:

- durante os horários diurnos, quando há incidência de radiação solar, os valores medidos e simulados são muito próximos;
- durante os horários noturnos observam-se diferenças máximas da ordem de 2 a 3 $^{\circ}\text{C}$ entre os valores;
- para as duas primeiras noites, com temperaturas ambientais mais elevadas, os valores simulados são maiores que os medidos;
- para a terceira noite, com temperatura ambiental em processo de declínio, os valores medidos e simulados praticamente se igualam;
- para a quarta noite, com temperaturas ambientais mais baixas, os valores medidos são maiores que os simulados.
- durante os horários onde ocorre aquecimento e resfriamento do ar interior da estufa, os valores são praticamente idênticos;
- o perfil e a tendência das curvas para os valores medidos e simulados são similares.

Observa-se ainda que, nesta simulação, considerada a amplitude de temperaturas de 25 $^{\circ}\text{C}$ (de -5 a 20 $^{\circ}\text{C}$), as diferenças máximas e pontuais entre os valores medidos e simulados são da ordem de 12 %.

Apesar da ausência de avaliação sobre alguns aspectos com relativa influência no modelo, uma análise conclusiva sobre esta simulação permite afirmar que, na comparação entre os

valores medidos e simulados para a temperatura do ar na zona, os resultados são bastante próximos e validam o modelo físico e sua rotina computacional.

Na figura 5.3 é apresentado o gráfico comparativo entre as temperaturas do ar obtidas experimentalmente, para o ambiente externo (tamb) e para a zona (tzonamed), e as temperaturas da zona (tzona) calculadas pela rotina computacional relativas ao período de 24 a 28 de julho.

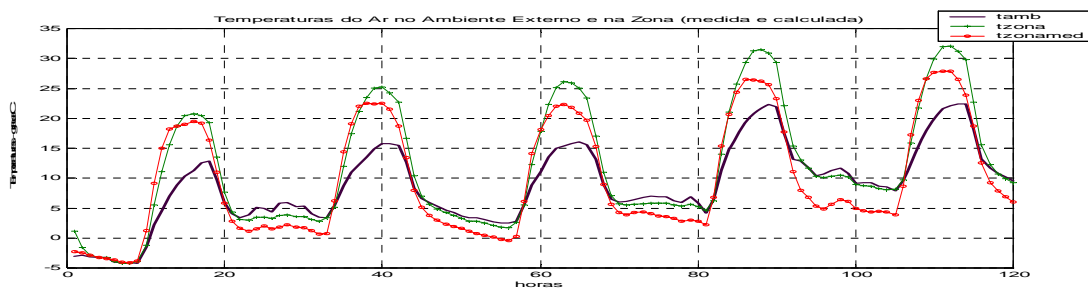


Fig. 5.3 – Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed) e simulada pela rotina computacional (tzona), relativas ao período de 24 a 28 de julho.

Para esta seqüência, a análise comparativa, entre os valores medidos e simulados para a temperatura do ar na zona, permite as seguintes conclusões:

- durante os horários de maior incidência de radiação solar, os valores simulados são maiores que os valores medidos. Nos dias de maior temperatura estas diferenças podem chegar a aproximadamente 5 °C;
- nos horários relativos aos períodos noturnos, a inversão térmica medida é muito mais acentuada que a simulada, chegando a diferenças da ordem de -2 a -4 °C;
- durante os horários onde ocorre aquecimento e resfriamento do ar interior da estufa, os valores são bastante coincidentes;
- o perfil e a tendência das curvas para os valores medidos e simulados são similares.

Nesta simulação, considerada a amplitude de temperaturas de 40 °C (de -5 a 35 °C), as diferenças máximas e pontuais entre os valores medidos e simulados são da ordem de 12,5 %.

Com os mesmos critérios da análise feita para a simulação anterior, pode ser concluído que os resultados desta simulação são próximos aos valores obtidos experimentalmente.

Os resultados simulados seriam mais próximos dos medidos, se fossem incluídos no modelo os termos representativos: do regime transiente de condução calor para o solo; da influência da velocidade e direção do vento nos coeficientes de transferência de calor por convecção; da interferência da umidade e condensação de água nas superfícies internas e externas da cobertura da estufa

Melhor certeza da eficácia da modelagem, também poderia ser verificada com diversificação (fora da mesma coluna) dos pontos de medição de temperatura do ar interior, visto que o processo utilizado pode ter sofrido influência de vórtices convectivos internos (ascendentes e descendentes), gerando imprecisões nos valores medidos. Mais exatidão nos valores de temperatura celeste também agregaria mais certeza às comparações do experimento com a simulação.

Por último, entende-se que informações complementares a respeito do manejo da estufa, bem como observações diárias do comportamento meteorológico na região são fatores que complementaríamos a verificação de maior eficácia da modelagem.

A partir da análise das componentes direta e difusa da radiação solar, concluiu-se que este período simulado caracterizou-se por dias e noites com pouca ou nenhuma cobertura de nuvens. Tal condição também pode ser expressada por uma temperatura da abóbada celeste com valores menores. Por outro lado, os testes de sensibilidade aplicado ao modelo, conforme relatado no capítulo anterior, indicaram que a temperatura celeste tem forte influência nos resultados simulados pelo modelo. De outra forma, quando não se dispõe de informações mais precisas sobre o comportamento da temperatura da abóbada celeste, para dias "limpos" é possível utilizar-se temperaturas celeste da ordem de -35 a -50 °C [Duffie et al. (1990)].

Apenas como procedimento para verificar a influência desse parâmetro quando comparada

com valores medidos, a figura 5.4 apresenta o resultado de uma simulação para o mesmo período utilizando-se temperatura celeste fixa em -35°C .

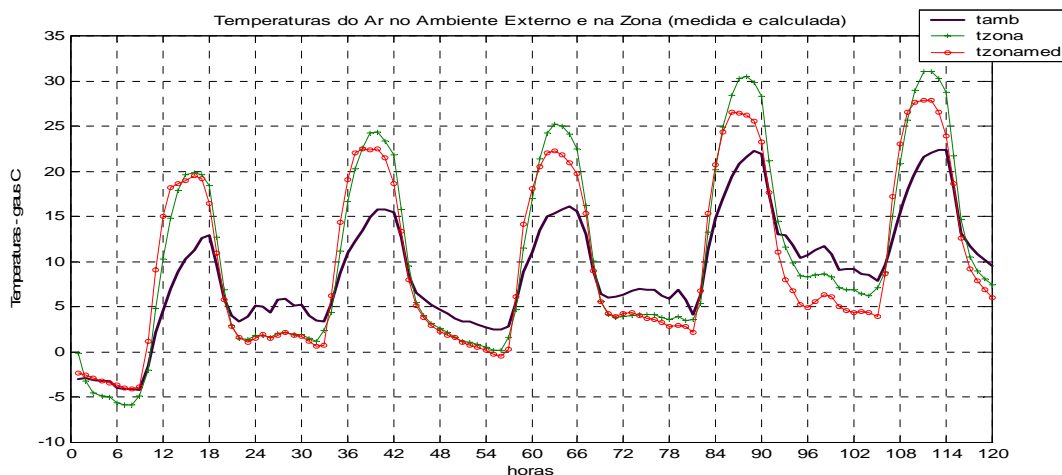


Fig. 5.4 – Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed) e simulada pela rotina computacional (tzona), relativas ao período de 24 a 28 de julho, com temperatura da abóbada celeste fixada em -35°C .

Nesta última simulação, observa-se uma aproximação muito grande entre os valores medidos e simulados no período diurno e, praticamente, uma coincidência de ambos valores no período noturno, principalmente nas primeiras noites. Este exemplo, confirma também a importante influência da temperatura da abóbada celeste na modelagem, tornando imprescindível o acompanhamento mais preciso deste parâmetro.

Conclusões

A pesquisa bibliográfica revela que a literatura técnica apresenta uma quantidade bastante significativa de estudos sobre o comportamento térmico de estufas, o que mostra a importância do tema. Apesar disso, poucos autores desenvolveram modelagens detalhadas e abrangentes sobre o assunto.

A partir de hipóteses adotadas e uma integração de duas propostas de modelagem, sendo uma para edificações comuns e outra adaptada especificamente para estufas com cobertura plástica, desenvolveu-se uma modelagem das equações de balanço de energia. Com ela, foi possível obter-se o comportamento da temperatura do ar da zona, a partir da temperatura do ar no ambiente exterior e das componentes direta e difusa da radiação solar incidente na estufa, grandezas que podem ser medidas com certa facilidade.

Posteriormente, após a transformação do modelo físico-matemático em rotina computacional, resolvido pelo método de Gauss-Seidel, os resultados obtidos com as primeiras simulações indicam um comportamento térmico esperado e compatível com estufas com cobertura de material polietilênico, decorrentes dos fenômenos de transferência de calor por condução, por convecção e, principalmente, pela radiação térmica em ondas curtas e longas. Os resultados obtidos representam a influência diurna da radiação solar nas condições meteorológicas internas, assim como as perdas noturnas em ondas longas, tanto das superfícies das coberturas, como do solo interior para o céu. Nesta etapa define-se, portanto, que a rotina pode ser empregada com dados reais medidos.

Finalmente, confirmando em grande parte as hipóteses adotadas para a modelagem física, o modelo computacional simulado apresenta respostas coerentes e muito próximas ao do modelo medido.

Portanto, conclui-se que a modelagem adotada é capaz de representar as temperaturas internas com grande aproximação, mesmo considerando a carência de diversas melhorias para a modelagem e para os experimentos de campo, todas sugeridas detalhadamente.

Entende-se que o presente trabalho cumpre com os objetivos propostos inicialmente, pois a modelagem desenvolvida e sua respectiva rotina computacional apresentam resultados próximos

dos valores obtidos em medições experimentais.

Para futuros trabalhos, permite-se sugerir:

- no modelo físico, incluir termos representativos da umidade relativa do ar, da condensação nas superfícies plásticas, da cultura vegetal nos diversos estádios de crescimento produtivo, de condução no solo em regime transiente e da variação dos coeficientes de troca de calor por convecção, considerando a influência e direção do vento;
- nas pesquisas de campo, medir a temperatura celeste e suas relações com as condições climáticas; integrar uma análise detalhada do comportamento do plástico para ondas longas e curtas, inclusive quanto a degradação das propriedades;
- na rotina computacional, desenvolver "interfaces amigáveis tipo toolbox" para acesso à rotina e alteração dos parâmetros de entrada; incluir subrotinas para cálculo da radiação solar incidente em superfícies não horizontais, caracterizando local e período do ano.

Referências Bibliográficas

- Duffie, J. e Beckman, W., 1990. **Solar Engineering of Thermal Process**. 2a. ed. New York, EUA. Ed. John Wiley and Sons.
- Ferreira, J. L., 2002. **Simulação do Comportamento Térmico de Estufas Agrícolas com Cobertura Plástica**. Dissertação de Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC)-UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 101 p.
- Frisina, V. A. e Escobedo, J. F., 1998. **Balances de Radiação Solar e de Energia em Estufa com Cobertura de Polietileno**. Departamento Ciências Ambientais, UNESP, Botucatu, São Paulo, Brasil, 7 p.
- Garzoli, K. V. e Blackwel, J., 1981. **An Analysis of the Nocturnal Heat Loss From a Single Skin Plastic Greenhouse**. Griffith, Austrália: CSIRO Division of Irrigation Research, 12 p.
- Gonzales-Real, M. M., 1996a. **La Calefaccion de los Invernaderos – Balance de Energía Simplificado Aplicado al Cálculo de las Necesidades Energéticas del Invernadero**. Conferências: Departamento de Ingeniería Rural, ETSIA, Madri, Espanha, 19 p.
- Gonzales-Real, M. M., 1996b. **La Calefaccion de los Invernaderos – Generalidades Sobre los Mecanismos de Transferência de Energia en Invernaderos**. Conferências: Departamento de Ingeniería Rural, ETSIA, Madri, Espanha, 11 p.
- Hanselman, D. e Littlefield, B., 1999. **MATLAB 5 – Guia do Usuário**. São Paulo, Brasil: Makron Books, 413 p.
- Schneider, P. S., 1994. **Comportement Thermo-aéraulique des Bâtiments: Stratégies de Resolution du Problème Couplé**. Tese de doutorado: Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, França, 246 p.
- UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- TRNSYS – A Transient System Simulation Program. Reference Manual**. 2000. Madison, EUA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.

Bibliografia Consultada

- Bejan, A., 1996. **Transferência de Calor**. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 540 p.
- Incropera, F. P. e Dewitt, D. P., 1998. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 4. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 494 p.
- Kämpf, A. N., 2000. **Produção Comercial de Plantas Ornamentais**. Guaíba, Brasil: Agropecuária, 254 p.
- Kimball, B. A., 1972 **Simulation of the Energy Balance of a Greenhouse**. Phoenix, EUA: U. S. Water Conservation Laboratory, 19 p.
- Lefas, C. C. e Santamouris, M. J., 1985. **Application of Microcomputers in Optimal Greenhouse Environmental Control and Resources Management**. Solar & Wind Technology, No. 3, Inglaterra, 7 p.

- Modest, M. F., 1989. **Radiative Heat Transfer**. New York, EUA: McGraw-Hill, 832 p.
- Nijskens, J., Deltour, J., Coutisse, S. e Nisen, A., 1984. **Heat Transfer Through Covering Materials of Greenhouses**. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdã, Holanda, 22 p.
- Pieters, J. G. e Deltour, J. M., 1994. **Performances of Greenhouses With the Presence of Condensation on Cladding Materials**. American Society of Agricultural Engineers - ASAE, EUA, 7 p.
- Schneider, P. S., 2000a. **Comportamento Térmico de Ambientes**. Notas de aula: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC)-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Schneider, P. S., 2000b. **Radiação Térmica**. Notas de aula: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC)-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Schneider, P. S. e Vielmo, H. A., 1997. **Desenvolvimento de Mecanismos Visando o Controle Térmico do Ambiente Interno de Estufas Para Plasticultura**. Relatório FAPERGS-SEBRAE, Porto Alegre, Brasil.
- Schneider, P. S. e Vielmo, H. A., 1998. **Desenvolvimento de Mecanismos Visando o Controle Térmico do Ambiente Interno de Estufas Para Plasticultura**. Relatório FAPERGS-SEBRAE, Porto Alegre, Brasil.
- Schneider, P. S. e Vielmo, H. A., 2000. **Desenvolvimento de Mecanismos Visando o Controle Térmico do Ambiente Interno de Estufas Para Plasticultura**. Relatório FAPERGS-SEBRAE, Porto Alegre, Brasil.
- Schneider, P. S. e Tondello, G. M., 1998. **Estudo Comparativo de Transmissividade Espectral de Filmes Plásticos Para Plasticultura**. Publicação do Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE)-
- Vielmo. H. A. e Schneider, P. S., 1999. **Melhoramentos e Simulação Numérica do Comportamento de Estufas Para Plasticultura**. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.