

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ESTUFAS AGRÍCOLAS COM COBERTURA PLÁSTICA

Jorge Luiz Ferreira (1) e Paulo Smith Schneider (2)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Sarmiento Leite 425, 90050-170 – Porto Alegre - RS

e-mail: (1) jorge.ferreira@terra.com.br (2) pss@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta a modelagem e a simulação de uma estufa agrícola com cobertura plástica. O modelamento dos fenômenos de transferência de calor são apresentados, com ênfase nas trocas térmicas radiantes, tanto do espectro solar como infravermelho. O modelo é implementado no ambiente MatLab e as simulações são efetuadas com dados reais obtidos para uma estufa da serra gaúcha. Os dados de entrada são a de temperatura do ar exterior e das componentes de radiação solar direta e difusa e a principal variável simulada é a temperatura do ar no interior da estufa. As respostas do modelo simulado são coerentes, mas verifica-se uma grande sensibilidade à temperatura de céu.

ABSTRACT

This work presents the modeling and simulation of a agricultural greenhouse with plastic covering. The modeling of the heat transfer phenomena are presented, highlighting the radiant exchanges in both solar and infrared spectra. The model is build up in MatLab environment, and simulations are runned with experimental data of a real greenhouse in the mountains of Rio Grande do Sul. The input data are the exterior air temperature and the direct and diffuse solar radiation components, and the main result is the ambient air temperature of the greenhouse. The answers of the model are coherent, although hardly dependent on the sky temperature

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento térmico de estufas com cobertura plástica 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, o foco é a melhoria do controle das condições biológicas e ambientais, envolvendo também aspectos energéticos. (Kimball, 1972, e Kämpf, 2000). As estufas cumprem a função de proteção das culturas das intempéries naturais, além de criar um ambiente mais favorável, onde o aporte de calor proveniente 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 freqüentes geadas que se formam na região, no período de inverno. (Schneider e

Vielmo, 1997,1998 e 2000). Seguindo esse esforço, o presente trabalho nasceu da necessidade de se desenvolver um modelo para o comportamento térmico dos ambientes estudados, privilegiando os fenômenos radiantes.

Antes de iniciar a construção de um modelo próprio, foi investigada a possibilidade de se empregar programas já existentes, como o TRNSYS(2000), com o seus módulos de simulação de edificações (*type 19 e 56*), mas os mesmos não representam suficientemente em detalhe os fenômenos radiantes encontrados em estufas. Optou-se, então, pelo desenvolvimento de uma rotina própria, adotando-se o programa MatLab [Hanselman et al. (1999)], combinado resultados obtidos por rotinas de processamento de radiação do TRNSYS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura mostra diferentes enfoques para a modelagem dos fenômenos de transferência de calor e massa no ambiente de estufas. Há os modelos de campo, onde a ênfase é dada nos fenômenos convectivos e difusos, que são simulados por métodos numéricos, como o de volumes finitos em Gauthier et al., 1997, Vielmo et al, 1999, Boesing, 2001, Garcia, 2001, bem como abordagens onde fenômenos específicos são estudados, como a radiação térmica. Nesse caso os demais fenômenos abordados são tratados de forma mais geral, mas sempre é necessário um modelo de balanço, em função dos acoplamentos verificados.

Gonzales-Real, 1996, apresenta estas montagens de balanços para estufas com coberturas plásticas, além de apresentar várias opções de sistemas de climatização. Uma proposta semelhante é encontrada em Schneider (1994), válida também para ambientes de edificações genéricas. O modelo envolve 3 níveis de balanços de energia: volume do ambiente ou da zona interna, superfícies internas e externas, agrupados em função de suas variáveis de acoplamento.

Seguindo o mesmo conceito, Garzoli et al., 1981, apresentam um equacionamento específico para as perdas noturnas na estufa com cobertura de polietileno. Ao abordar a acumulação térmica do solo, Gonzales-Real (1996) cita que a transferência de calor pode ser modelada 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 as variações mais importantes são verificadas numa profundidade de cerca de 0,15 m, quando não houver sistema de calefação ligado ao solo. Essa observação implica em dizer que as perdas térmicas para o solo são pequenas se comparadas com os termos dos balanços.

3. MODELAGEM FÍSICA

O volume de controle definido para o problema tem suas fronteiras nas superfícies externas da estufa, e o objetivo final é determinar a temperatura do ar na zona interna, a partir do conhecimento da temperatura do ar no ambiente externo e da radiação solar incidente. A modelagem física está baseada nas seguintes hipóteses de simplificação: **a)** a temperatura do ar no ambiente interno da estufa é considerada como uniforme, constituindo uma única zona térmica, ou monozona; **b)** as propriedades térmicas do ar, do solo e dos demais materiais são tomadas como constantes; **c)** despreza-se a influência da umidade relativa do ar, da ocorrência de condensação nas superfícies da estufa, assim como da velocidade do vento nas superfícies externas; **d)** 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; **e)** desconsidera-se radiação de ondas longas de origem externa incidente na zona interna; **f)** despreza-se a influência da camada vegetal no comportamento térmico da estufa [Frisina et al. (1998)]; **g)** 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); e **h)** a condução do calor no solo é tomada como sendo em regime permanente.

A figura 1 apresenta os fluxos térmicos do problema, onde a energia que entra no sistema é convencionalmente considerada como positiva. Nesse esquema, qcd''_{solo} é o fluxo de calor entre o solo e a zona interna, $qcv''_{externo}$ e $qcv''_{interno}$ são os fluxos de calor convectivo nas superfícies externas e interna, respectivamente, $qroc''_{interno}$ e $qroc''_{externo}$ são os fluxos de calor radiante em ondas curtas ($\lambda < 2,5\mu m$) trocado entre as superfícies internas e as externas, respectivamente, $qrol''_{externo}$ e $qrol''_{solo-céu}$ são os fluxos de calor radiante em ondas longas ($\lambda > 2,5\mu m$) trocado entre as superfícies externas e entre o solo interno e o céu, respectivamente, todos em W/m^2 . qm é a taxa de troca de calor aportada pela ventilação ou infiltração de ar, em W. A incógnita nesse problema é a temperatura da zona interna T_{zona} e $T_{ar_externo}$, $T_{céu}$, T_{solo} e $T_{solo-externo}$, respectivamente as temperaturas do ar externo, da abóbada celeste e da superfície do solo a uma dada profundidade, são dados do problema, todas em K.

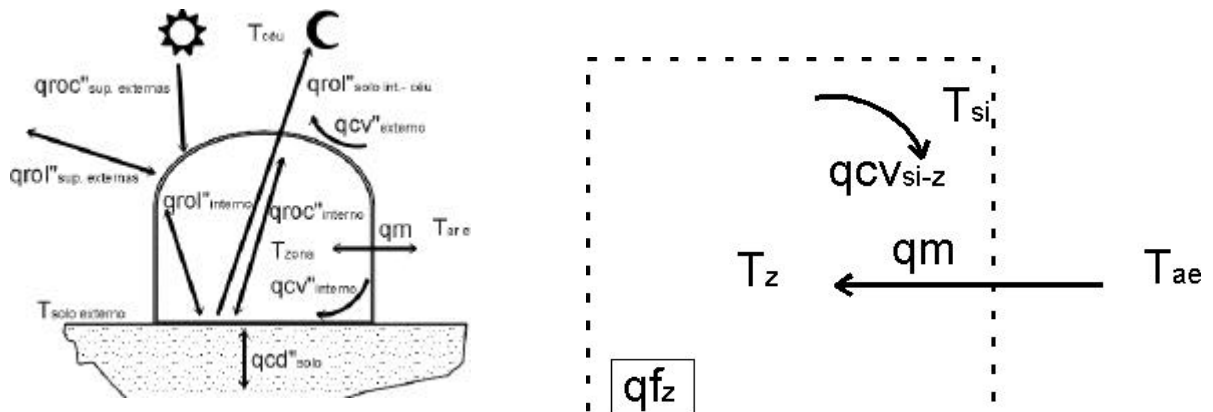


Fig.1 – Diagrama representativo dos fluxos térmicos na estufa e dos fluxos térmicos na zona interna

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.

Como a incógnita do problema é a temperatura do ar no volume interno da estufa, inicia-se pelos balanços na zona interna, como mostra a mesma figura. O fluxo qac_z é a taxa de calor acumulado pelo ar da zona, qcv_{si-z} é a taxa de calor por convecção, qm é a taxa de calor relativa à ventilação ou infiltração de ar, qf_z é a taxa de calor eventualmente gerada na zona por um sistema de climatização. T_{ae} , T_{si} e T_z são a temperatura do ambiente externo, das superfícies internas e da zona, respectivamente, em K.

A equação de balanço de energia, em W, para um conjunto genérico de zonas, é dado por:

$$\{qac_z\} = \{qcv_{si-z}\} + \{qm\} + \{qf_z\} \quad [Eq. 01]$$

O termo convectivo traz o acoplamento da variável temperatura das superfícies internas T_{si} e um balanço de energia nessas superfícies é montado como mostra a figura:

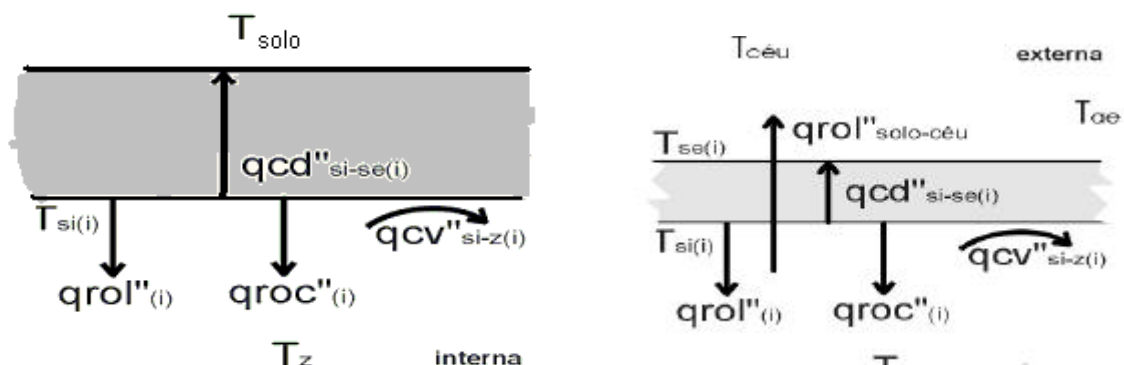


Fig.2 –Balanço de energia entre as superfícies interna e a zona (esq.) e o solo (dir.)

onde qcd''_{si-se} é o fluxo condutivo entre as superfícies internas e externas, $qrol''_i$ e $qroc''_i$ são os fluxos radiantes líquidos para ondas longas e curtas, respectivamente, por superfície i , e $qrol''_{solo-céu}$ é o fluxo de calor radiante líquido para ondas longas entre o solo e o céu. Tse é a temperatura das superfícies externas, em K. O balanço com o solo é feito em regime permanente, supondo uma temperatura de solo T_{solo} , em K.

O conjunto das i superfícies que compõem a estufa são agrupados em vetores, e o balanço dos fluxos de calor, em W/m^2 , é dado como segue:

$$\{qcd''_{si-se}\} = \{qcv''_{si-z}\} + \{qrol''\} + \{qroc''\} - \{qrol''_{solo-céu}\} \quad [Eq. 02]$$

A figura 3 apresenta o diagrama do balanço de energia das superfícies externas.

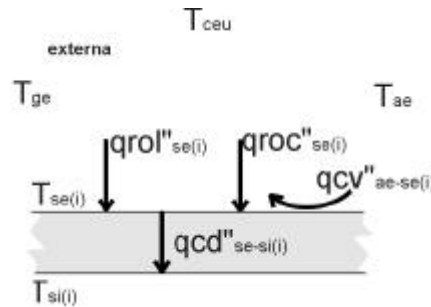


Fig. 3 - Diagrama do balanço de energia para as superfícies externas

Nela o termo qcd''_{se-si} é o fluxo de calor condutivo no material de cobertura, qcv''_{ae-se} é o fluxo de calor convectivo para as superfícies externas, $qroc''_{se}$ é o fluxo de calor radiante líquido externo em ondas curtas por superfície, e $qrol''_{se}$ é o fluxo de calor radiante líquido em ondas longas por superfície, todos em W/m^2 . T_{ceu} é a temperatura equivalente de corpo negro da abóboda celeste, em K

O balanço de energia para o conjunto das i superfícies externas é representado pela seguinte expressão:

$$\{qcd''_{se-si}\} = \{qcv''_{ae-se}\} + \{qrol''_{se}\} + \{qroc''_{se}\} \quad [Eq. 03]$$

As relações funcionais resultantes dos 3 níveis de balanço podem ser apresentadas como:

$$f_{zona} = f(T_z, T_{si}, T_{ae}) \quad f_{interna} = f(T_z, T_{si}, T_{se}, T_{ceu}, T_{solo}) \quad f_{externa} = f(T_{ae}, T_{si}, T_{se}, T_{ceu}) \quad [Eq. 04]$$

As temperaturas T_z , T_{si} e T_{se} são as variáveis acopladas do problema, enquanto que as demais temperaturas são consideradas como conhecidas. A solução também depende do conhecimento das componentes difusa e direta da radiação solar em ondas curtas.

4. ROTINA COMPUTACIONAL

O conjunto de equações não lineares, resultante do modelo apresentado, é resolvido por uma rotina computacional implementada no software **MatLab**, empregando-se o método de Gauss-Seidel. Os testes para validação da rotina foram feitos utilizando-se dados meteorológicos horários em situações típicas de inverno e de verão, relativos à cidade de Porto Alegre. Os dados de radiação para superfícies orientadas foram obtidos com o emprego dos processadores de radiação solar do programa **TRNSYS**. Os resultados obtidos para essa condição são apresentados na figura que segue.

Os resultados obtidos com esta e outras simulações semelhantes indicam um comportamento térmico esperado para estufas com cobertura plástica. A presença de radiação solar, nos períodos diurnos, leva ao acréscimo da temperatura do ar na zona, relativamente à temperatura do ar externo. Nos períodos noturnos, os valores de ambas temperaturas aproximam-se. 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. Os testes de sensibilidade aplicados a transmissividade em ondas longas, a temperatura celeste e aos coeficientes de transferência de calor convectivo interno e externo, entre outros, indicaram que os parâmetros que exigem maior acuracidade são aqueles relativos à transmissividade em ondas longas do plástico e à temperatura celeste. A coerência dos resultados permitiu concluir que a rotina computacional desenvolvida com base nesse modelo físico pode ser empregada para simulação com dados reais.

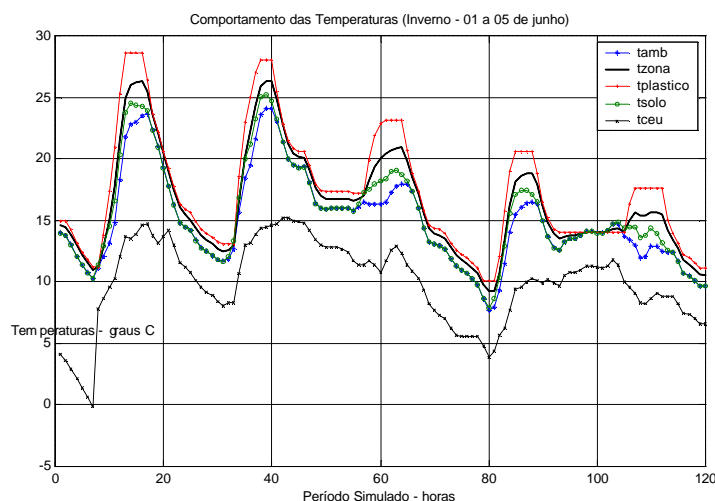


Fig. 4 - Evolução da temperatura do ar na zona (tzona) e do ar no ambiente externo (tamb) para o período de 01 a 05 de junho em Porto Alegre.

Os resultados obtidos com esta e outras simulações semelhantes indicam um comportamento térmico esperado para estufas com cobertura plástica. A presença de radiação solar, nos períodos diurnos, leva ao acréscimo da temperatura do ar na zona, relativamente à temperatura do ar externo. Nos períodos noturnos, os valores de ambas temperaturas aproximam-se. 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. Os testes de sensibilidade aplicados a transmissividade em ondas longas, a temperatura celeste e aos coeficientes de transferência de calor convectivo interno e externo, entre outros, indicaram que os parâmetros que exigem maior acuracidade são aqueles relativos à transmissividade em ondas longas do plástico e à temperatura celeste. A coerência dos resultados permitiu concluir que a rotina computacional desenvolvida com base nesse modelo físico pode ser empregada para simulação com dados reais.

5. 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. A leitura da radiação solar total e da componente difusa, sempre sobre o plano horizontal, foi obtida com dois piranômetros, montados numa pequena estação meteorológica, que também forneceu a temperatura do ar do ambiente externo. A aquisição das temperaturas do ambiente interno foi feita por meio de sensores posicionados nas cotas 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m e 4 m de altura. As diferenças entre essas temperaturas não foi muito grande, ficando perto do erro experimental, o que reforçou a hipótese da adoção do modelo tipo monozona para o ambiente interno

A figura 4 apresenta a comparação 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. O gráfico permite concluir que durante os horários diurnos, quando há incidência de radiação solar, os valores medidos e simulados são muito próximos. Também é possível ver que durante os horários noturnos observam-se diferenças máximas da ordem de 2 a 3 °C entre os valores. Para as duas primeiras noites, com temperaturas ambientais mais elevadas, os valores simulados são maiores que os medidos, mas para a terceira noite, com temperatura ambiental em 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. Em geral, o comportamento observado nas curvas mostra uma tendência semelhante para os valores medidos e simulados. Nessa simulação a amplitude de temperaturas externas foi de 25 °C, variando de -5 a 20 °C, e as diferenças máximas entre os valores medidos e simulados são da ordem de 12 %.

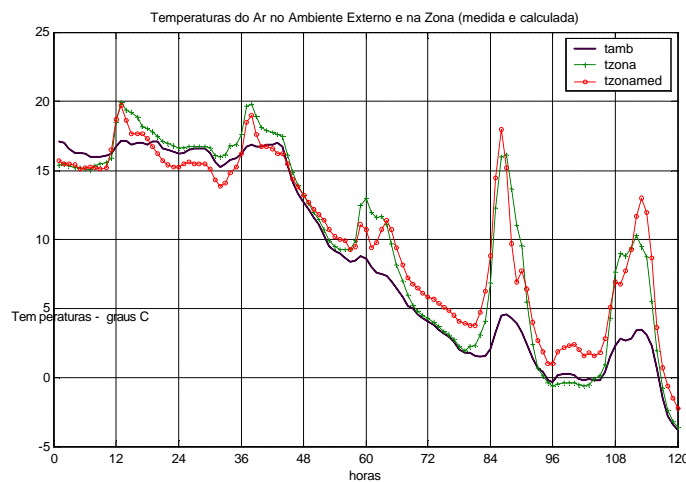


Fig.4 – Temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed), e simulada (tzona). (período de 9 a 13 de julho)

A figura 5 apresenta outra seqüência de dados experimentais e de valores calculados para a temperatura interna da zona. Para esta seqüência, observa-se que durante os horários de maior incidência de radiação solar, os valores simulados são maiores que os valores medidos. Nos dias em que a temperatura do ar exterior é maior, estas diferenças podem chegar a aproximadamente 5 °C. No períodos noturnos, a inversão térmica medida é muito mais acentuada que a simulada, chegando a diferenças da ordem de -2 a -4 °C. A amplitude das temperaturas do ar exterior chegam a 40 °C (de -5 a 35 °C), e as diferenças máximas entre os valores medidos e simulados são da ordem de 12,5 %. As diferenças encontradas entre os dados experimentais e os simulados indicam que o fenômeno analisado deve ser modelado com maior definição. Os fenômenos de transferência de massa e umidade não foram considerados, e devem modificar os resultados simulados já que o terreno da estufa é bastante úmido. 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.

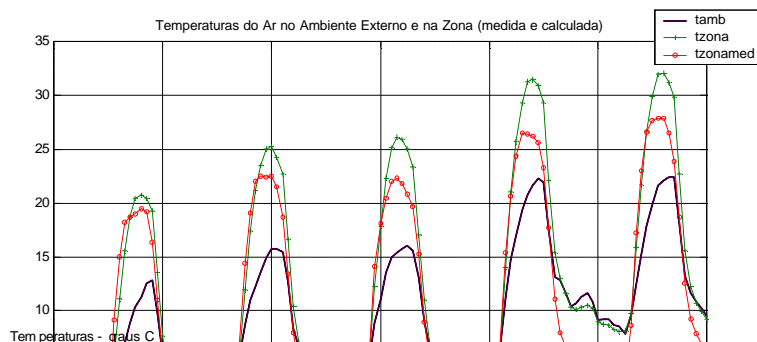


Fig. 5 – Temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed), e simulada (tzona). (período de 24 a 28 de julho)

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 aplicados ao modelo indicaram que a temperatura celeste tem forte influência nos resultados simulados. 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 à -50 °C [Duffie et al. (1990)]. Para testar esse comportamento, a figura 6 apresenta o resultado de uma simulação para o mesmo período utilizando-se temperatura celeste fixa em -35 °C

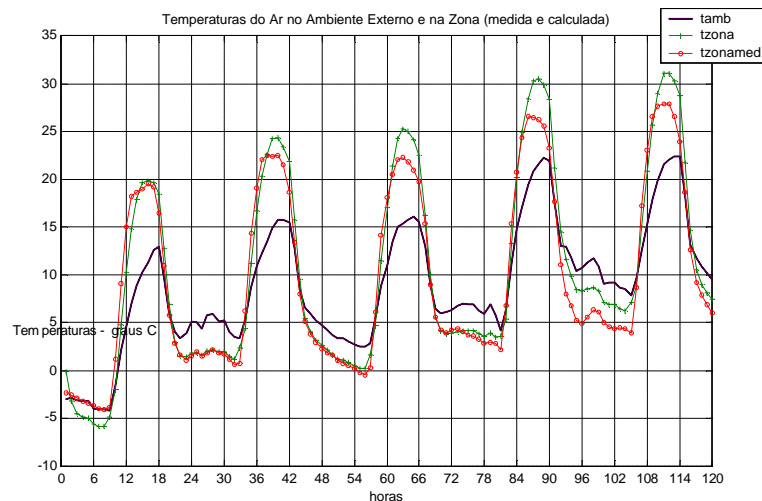


Fig.6 – Temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed), e simulada (tzona), (período de 24 a 28 de julho, temperatura da abóbada celeste fixada em -35 °C).

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 influência da temperatura da abóbada celeste na modelagem, tornando imprescindível o acompanhamento mais preciso deste parâmetro.

6. CONCLUSÕES

O modelo proposto para a simulação do comportamento térmico de estufas partiu de propostas de modelagem empregadas em para edificações convencionais, e a foi sendo adaptada especificamente para estufas com cobertura plástica, como a inclusão das trocas radiantes noturnas em superfícies semitransparentes.

O modelo permitiu 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 foram medidas experimentalmente. O fenômeno físico melhor detalhado é o transferência radiante em ondas curtas e longas, e os resultados obtidos com as primeiras simulações indicam um comportamento térmico esperado e compatível com estufas com cobertura de material

plástico. Essa escolha permitiu acompanhar a influência diurna da radiação solar nas condições térmicas internas, assim como as perdas noturnas em ondas longas, tanto das superfícies das coberturas, como do solo interior para o céu. Finalmente, o emprego de dados de temperatura do ambiente externo e das componentes de radiação solar medidos experimentalmente para alimentar a simulação acabou por confirmar, em grande parte, as hipóteses adotadas para a modelagem física, e os resultados se aproximam das respostas reais medidas para a temperatura do ar do ambiente interno da estufa.

Ainda percebe-se que o modelo físico deve incluir termos representativos da umidade relativa do ar, da condensação nas superfícies plásticas, 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. Como foi percebida uma forte sensibilidade das respostas em relação à temperatura de céu, fica a sugestão de integrar essa medição em futuros projetos experimentais nessa área.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOESING, I., (2001), Simulação Numérica dos Campos Térmico e Hidrodinâmico em Estufas de Plasticultura, Dissertação de Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) – UFRGS, Porto Alegre.

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.

FRISINA, V. A. e ESCOBEDO, J. F., (1998). Balanços de Radiação Solar e de Energia em Estufa com Cobertura de Polietileno. Departamento Ciências Ambientais, UNESP, Botucatu, São Paulo.

GARCIA, M.C.R., (2001), Simulação Numérica de um Sistema de Armazenamento de Calor em Estufas de Plasticultura, Dissertação de Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) – UFRGS, Porto Alegre.

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.

GAUTHIER C., LACROIX M. e BERNIER H., (1997), Numerical Simulation of Soil Heat Exchanger-Storage System for Greenhouses. J. Solar Energy 60, 333-346.

GONZALES-REAL, M. M., (1996). 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.

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.

HANSELMAN, D. e LITTLEFIELD, B., (1999), MATLAB 5 – Guia do Usuário. São Paulo, Brasil: Makron Books.

KÄMPF, A. N., (2000). Produção Comercial de Plantas Ornamentais. Guaíba, Brasil: Agropecuária

KIMBALL, B. A., (1972), Simulation of the Energy Balance of a Greenhouse. Phoenix, EUA: U. S. Water Conservation Laboratory.

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.

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.

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.