

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ESTUFAS AGRÍCOLAS  
COM COBERTURA PLÁSTICA

por

Jorge Luiz Ferreira

Dissertação para obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, junho de 2002.

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ESTUFAS AGRÍCOLAS  
COM COBERTURA PLÁSTICA

por

Jorge Luiz Ferreira

Eng. Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo S. Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Prof. Dr. Arno Krenzinger

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo

Prof. Dr. Alberto Tamagna

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 28 de junho de 2002.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelo suporte aos projetos de pesquisa ligados aos mecanismos para a climatização de ambientes protegidos para agricultura.

À Sra. Clarice Bochese Simm, diretora da Flora Brasiliae, que apoiou as ações desse projeto de pesquisa.

Ao Prof. Paulo S. Schneider, pela paciência, dedicação e, principalmente, pela fundamentação teórica transmitida, base do desenvolvimento deste trabalho, encaminhando soluções nos momentos mais adequados e necessários.

À minha esposa, filhos e familiares, pelo apoio e por suportarem os momentos de inquietude e de ausência.

*Dedico este trabalho aos meus filhos, como exemplo, para que aproveitem todas as oportunidades disponíveis para seu desenvolvimento pessoal e profissional, conciliando-os com a juventude, quando tudo é mais fácil e quando não se tem um elenco maior de compromissos.*

## RESUMO

Este trabalho objetiva modelar o comportamento térmico de uma estufa agrícola, com área aproximada de 1500 m<sup>2</sup> e com cobertura plástica de polietileno de baixa densidade, a partir de um modelo físico e uma rotina computacional desenvolvidos especificamente.

O equacionamento adotado nesta modelagem dá maior importância para a descrição dos fenômenos radiantes, que são tratados de maneira mais detalhada, se comparados aos fenômenos de transferência de calor por convecção e condução.

O modelo proposto é capaz de simular a temperatura do ambiente interno da estufa, a partir de dados externos, como a temperatura do ar e a radiação solar incidente. Posteriormente, os resultados obtidos pela simulação são comparados com dados experimentais, recolhidos ao longo de um projeto de pesquisa, realizado em estufas para produção de rosas na serra gaúcha.

Constata-se um bom nível de aproximação dos valores simulados com o comportamento medido, permitindo concluir que, embora necessite de melhorias na modelagem, e também na parte experimental, o modelo acompanha os fenômenos reais ocorridos.

## **ABSTRACT**

### **SIMULATION OF THE THERMAL BEHAVIOR OF AGRICULTURAL GREENHOUSES WITH PLASTIC COVERING**

The aim of this work is to model the thermal behavior of an agricultural greenhouse, with an approximate area of  $1500 \text{ m}^2$  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.

## ÍNDICE

	Pág.
1. Introdução .....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Metodologia e escopo do trabalho .....	2
2. Revisão bibliográfica .....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Modelagem dos balanços de energia .....	4
2.3. Propriedades e comportamento térmico das superfícies .....	8
3. Modelagem física.....	10
3.1. Introdução .....	10
3.2. Hipóteses gerais adotadas .....	10
3.3. Balanço de energia para a zona interna.....	12
3.4. Balanço de energia entre as superfícies internas e a zona .....	15
3.5. Balanço de energia das superfícies externas .....	22
3.6. Conclusões .....	27
4. Desenvolvimento da rotina computacional.....	28
4.1. Introdução .....	28
4.2. Descrição da rotina computacional .....	28
4.2.1 Módulo de atribuição de valores fixos.....	29
4.2.2. Montagem das matrizes e vetores .....	33
4.2.3. Módulo de leitura de dados horários.....	34
4.2.4. Módulo de cálculo das temperaturas das superfícies externas, internas e da zona.....	34
4.2.5. Graficação dos resultados .....	34
4.3. Preparação dos dados utilizados na simulação .....	34
4.3.1. Considerações sobre o aplicativo TRNSYS.15 .....	36
4.4. Os resultados da simulação .....	37
4.5. Testes de sensibilidade.....	41
4.6. Conclusões .....	44
5. Simulação com dados experimentais .....	45
5.1. Introdução .....	45
5.2. Características dimensionais da estufa.....	45
5.3. Instrumentação e procedimentos para as medições .....	46

5.4. Seleção e preparação dos dados .....	48
5.5. Simulação com dados reais, resultados e análise .....	52
5.5. Conclusões .....	57
6. Conclusões .....	59
Referências Bibliográficas .....	61
Bibliografia Consultada.....	64
Anexo 1 – Algoritmo da rotina computacional .....	65
Anexo 2 – Listagem da rotina computacional.....	74
Anexo 3 – Arquivos de dados .....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área da superfície $i$	$[m^2]$
$cp_{ar}$	calor específico do ar no ambiente externo e na zona	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
$Eb_{ol}$	emitância de corpo negro, em ondas longas, nas sup. internas	$[W.m^{-2}]$
$F_{i-ae}$	fator de forma entre as sup. externas e o ambiente externo	
$F_{i-ceu}$	fator de forma entre as superfícies externas e o céu	
$F_{i-ge}$	fator de forma entre as sup. externas e o solo externo	
$F_{i-j}$	fator de forma entre a sup. internas $i$ para as sup internas $j$	
$F_{j-i}$	fator de forma da sup. interna $j$ para a sup interna $i$	
$F_{solo-céu}$	fator de forma entre a superfície do solo (interno) e o céu	
$G_{df}^e$	irradiância difusa nas sup. externas	$[W.m^{-2}]$
$G_{df(i)}^0$	irradiância em ondas curtas difusa nas sup. externas	$[W.m^{-2}]$
$G_{dr}^e$	irradiância direta nas sup. externas	$[W.m^{-2}]$
$G_{dr(i)}^0$	irradiância em ondas curtas direta nas sup. externas	$[W.m^{-2}]$
$G_{oc(i)}$	irradiância em ondas curtas nas sup. internas	$[W.m^{-2}]$
$G_{oc}^e$	irradiância total nas sup. externas	$[W.m^{-2}]$
$G_{oc(i)}^0$	irradiância total em ondas curtas de origem externa	$[W.m^{-2}]$
$G_{ol}$	irradiância em ondas longas para as sup. internas	$[W.m^{-2}]$
$haese$	coeficiente de troca de calor convectivo entre o ambiente externo e as superfícies externas	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
$hsiz$	coeficiente de troca de calor por convecção entre a superfície $i$ e a zona	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
$i$	superfície em observação	
$j$	demais superfícies da cavidade	
$J_{oc(i)}$	radiosidade em ondas curtas nas sup. internas	$[W.m^{-2}]$
$J_{oc(i)}^0$	radiosidade primária em ondas curtas nas sup. internas	$[W.m^{-2}]$
$J_{ol}$	radiosidade em ondas longas das sup. internas	$[W.m^{-2}]$



$k$	condutividade térmica do material das superfícies	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
$L$	espessura considerada para a superfície	$[m]$
$\dot{m}$	taxa de massa de ar entre o ambiente externo e a zona	$[kg.s^{-1}]$
$nr$	renovações do volume de ar na zona	$[h^{-1}]$
$qac_z$	taxa de calor acumulado na zona	$[W]$
$qcd_{se-si(i)}''$	fluxo de calor condutivo entre as sup. externas e internas	$[W.m^{-2}]$
$qcd_{si-se}''$	fluxo de calor condutivo entre as sup. internas e externas	$[W.m^{-2}]$
$qcd_{solo}''$	fluxo de calor condutivo no solo interno da estufa	$[W.m^{-2}]$
$qcv_{externo}''$	fluxo de calor convectivo nas superfícies externas	$[W.m^{-2}]$
$qcv_{int\ ermo}''$	fluxo de calor convectivo nas superfícies internas	$[W.m^{-2}]$
$qcv_{si-z}$	taxa de calor transferida para zona por convecção	$[W]$
$qcv_{ae-se}''$	fluxo de calor convectivo para as sup. externas	$[W.m^{-2}]$
$qcv_{si-z}''$	fluxo de calor convectivo entre as sup. internas e a zona	$[W.m^{-2}]$
$qf_z$	taxa de calor fornecido para a zona	$[W]$
$qroc''$	fluxo de calor radiante líquido para ondas curtas por superfície	$[W.m^{-2}]$
$qroc_{int\ ermo}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas trocado entre as superfícies internas	$[W.m^{-2}]$
$qroc_i''$	fluxo radiante líquido para ondas curtas por superfície	$[W.m^{-2}]$
$qroc_{sup.\ externas}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas nas superfícies externas	$[W.m^{-2}]$
$qrol''$	fluxo de calor radiante líquido para ondas longas por superfície	$[W.m^{-2}]$
$qrol_i''$	fluxo radiante líquido para ondas longas por superfície	$[W.m^{-2}]$
$qrol_{int\ ermo}''$	fluxo de calor radiante em ondas curtas trocado entre as superfícies internas	$[W.m^{-2}]$
$qrol_{solo-céu}''$	fluxo de calor radiante líquido para ondas longas entre o solo e o céu	$[W.m^{-2}]$
$qrol_{solo\ int-céu}''$	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 <sup>-2</sup> ]
$solo$	índice relativo aos parâmetros para a superfície solo (interno)	
$t$	tempo	[s]
$T_{arexterno}$	temperatura do ar externo	[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]
$Tae$	temperatura do ambiente externo	[K]
$T_{céu}$	temperatura da abóbada celeste	[K]
$Tceu$	temperatura da abóbada celeste	[K]
$Tge$	temperatura do solo exterior a estufa	[K]
$Tse$	temperaturas das superfícies externas	[K]
$Tsi$	temperatura das superfícies internas	[K]
$Tz$	temperatura da zona	[K]
$V$	volume de ar na zona	[m <sup>3</sup> ]

## LETRAS GREGAS

$\alpha_{oc}$	absortividade para ondas curtas nas sup. externas	
$\alpha_{oc(i)}$	absortividade para ondas curtas das sup. internas	
$\alpha_{ol}$	absortividade das sup. internas para ondas longas	
$\varepsilon_{ol}$	emissividade das superfícies internas para ondas longas	
$\rho_{ar}$	massa específica do ar no ambiente externo e na zona	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{ol}$	reflectividade em ondas longas das sup internas	
$\rho_{oc(i)}$	refletividade para ondas curtas das sup. internas	
$\sigma$	constante de Stephan-Boltzman (5,67.10 <sup>-8</sup> )	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]
$\tau_{ol}$	transmissividade do plástico para ondas longas	
$\tau_{dr(i)}$	transmissividade para ondas curtas direta nas sup. internas	
$\tau_{df(i)}$	transmissividade para ondas curtas difusa nas sup. internas	

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
2.1	Representação gráfica do modelo de Garzoli et al. (1981)..... 5
2.2	Representação gráfica da modelagem de Frisina et al. (1988) ..... 6
2.3	Diagrama representativo do modelo de Schneider (1994)..... 6
2.4	Diagrama representativo do modelo de Gonzales-Real (1996) ..... 7
3.1	Diagrama representativo dos fluxos térmicos na estufa ..... 11
3.2	Diagrama representativo dos fluxos térmicos na zona interna ..... 12
3.3	Representação gráfica do balanço de energia entre as superfícies internas e a zona interna..... 15
3.4	Diagrama do balanço de energia para as superfícies externas..... 22
4.1	Fluxograma simplificado da rotina computacional..... 29
4.2	Tela de rotina para processamento do arquivo TRY no TRNSYS.15 ..... 35
4.3	Simulação da temperatura do ar na zona e da temperatura do ar no ambiente externo para dados relativos ao período de 1 a 5 de janeiro ..... 37
4.4	Simulação da temperatura do ar na zona e da temperatura do ar no ambiente externo para dados relativos ao período de 1 a 5 de janeiro, demonstrando as temperaturas da abóbada celeste, da superfície interna da cobertura horizontal e da superfície do solo interno da estufa ..... 38
4.5	Simulação da temperatura do ar na zona e da temperatura do ar no ambiente externo para dados relativos ao período de 1 a 5 de junho ..... 39
4.6	Simulação da temperatura do ar na zona e da temperatura do ar no ambiente externo para dados relativos ao período de 1 a 5 de junho, demonstrando as temperaturas da abóbada celeste, da superfície interna da cobertura horizontal e da superfície do solo interno da estufa..... 40
4.7	Variação da temperatura do ar na zona, relativa a simulação do período de 1 a 5 de junho, aplicando-se 0,2 e 0,8 para a transmissividade em ondas longas do plástico ..... 41
4.8	Resultados do teste de sensibilidade para variações da temperatura celeste e da transmissividade em ondas longas do polietileno ..... 42
4.8	Resultados do teste de sensibilidade para os coeficientes internos e externos de transferência de calor por convecção ..... 43
5.1	Dimensões e orientação geográfica das superfícies da estufa ..... 46
5.2	Piranômetro para medição de radiação solar utilizado nas medições..... 46

5.3	Desenho descritivo e foto do piranômetro com banda de sombreamento .....	47
5.4	A Estação Meteorológica.....	48
5.5	Representação gráfica das componentes direta e difusa de radiação solar incidente nas superfícies orientadas da estufa para o período de 9 a 13 de julho.....	49
5.6	Gráfico representativo dos valores medidos para a temperatura do ar no ambiente externo e dos valores calculados para a temperatura da abóbada celeste, no período de 9 a 13 de julho.....	50
5.7	Representação gráfica das componentes direta e difusa de radiação solar incidente nas superfícies orientadas da estufa para o período de 24 a 28 de julho.....	51
5.8	Gráfico representativo dos valores medidos para a temperatura do ar no ambiente externo e dos valores calculados para a temperatura da abóbada celeste, no período de 24 a 28 de julho.....	52
5.9	Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo e na zona Interna e simulada pela rotina computacional, relativas ao período de 9 a 13 de julho ...	53
5.10	Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo e na zona Interna e simulada pela rotina computacional, relativas ao período de 24 a 28 de julho .	54
5.11	Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo e na zona interna e simulada pela rotina computacional, relativas ao período de 24 a 28 de julho, utilizando temperatura da abóbada celeste igual a – 35 0C .....	56

## ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
4.1 Cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção para as superfícies verticais .....	30
4.2 Cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção para a superfície horizontal .....	31
4.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção externo pelas formulações de Sparrow e Mitchell.....	32
4.4 Fatores de forma para as superfícies internas do modelo .....	33

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

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 as 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 esta razão, o Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, foi procurado no início de 1997 pela Associação dos Produtores de Rosa da Serra Gaúcha para investigar soluções para o problema emergencial de congelamento de roseiras cultivadas em estufas, decorrente das freqüentes geadas que se formam na região, principalmente no período de inverno. Esta Associação, tem sede no município gaúcho de Antônio Prado, sendo formada por diversos sócios-produtores distribuídos na região da serra, dentre os quais a Agro Pecuária Clarice, no município de Campestre da Serra, onde foi desenvolvido um intenso trabalho de pesquisa. A propriedade estudada dispõe de cerca de 6500 m<sup>2</sup> de área cultivada em ambiente protegido, o que perfaz 13 estufas, além de áreas de cultivo a céu aberto.

Ao longo do tempo, essa pesquisa multidisciplinar contou com a participação de vários pesquisadores, alunos de Pós-Graduação ligados ao PROMEC-UFRGS, acadêmicos do Curso de Engenharia Mecânica e do apoio de um Técnico Agrícola.

O projeto gerou ações concretas para a solução dos problemas de congelamento e calefação dos ambientes, descritos em relatórios específicos [Schneider et al. (1997, 1998 e 2000)]. Nesse período, também foi produzido uma grande quantidade de dados experimentais em estufas e em laboratório, além de 3 dissertações de mestrado [Boesing (2001), Dias (2001) e Garcia (2001)].

Complementando as pesquisas, o presente trabalho foi motivado pela necessidade de se chegar num modelo de 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.

## 1.2. METODOLOGIA E ESCOPO DO TRABALHO

Um modelo capaz de simular o comportamento das estufas não aquecidas por meios artificiais, além da representação dos fenômenos, poderia simular também as necessidades de aportes energéticos para condições meteorológicas internas ideais, ou mais favoráveis, sob quaisquer outras condições meteorológicas e níveis de insolação presentes no ambiente externo a estufa, no decorrer das estações do ano. Permitiria também testar a influência do comportamento e efeitos das propriedades condutivas, convectivas e, principalmente, radiantes das superfícies internas e externas das estufas.

No início da pesquisa, por ser provido de interfaces que facilitariam a utilização e testes com diversificação de parâmetros de entrada, o programa que pareceu mais indicado 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, desenvolvido inicialmente para a simulação de sistemas solares, o qual, na versão atual, também é capaz de simular o comportamento térmico de edificações. As rotinas computacionais disponíveis no TRNSYS para essa finalidade são as chamadas TYPE 19 e TYPE 56, destinadas a simulações "monozona" e "multizona", respectivamente. As rotinas 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, possibilitando uma base de dados utilizada no ajuste e verificação de cada etapa do desenvolvimento da modelagem, a qual teve a seqüência descrita nos parágrafos seguintes.

No capítulo 2 promove-se uma revisão bibliográfica das principais publicações relacionadas com estufas de plasticultura, com especial ênfase à abordagem dada por cada autor a modelagem física e aos equacionamentos relativos ao balanço de energia, aos resultados obtidos e

as conclusões que, de alguma forma influenciaram e justificaram a modelagem e diretrizes adotadas neste trabalho.

No capítulo 3, desenvolve-se o modelo físico aplicando as equações de balanço de energia para o comportamento térmico de edificações, adaptando-se as modelagens de Schneider (1994) para edificações e de Garzoli et al. (1981) para perdas noturnas em estufas com cobertura em polietileno. Neles, o objetivo final é determinar a temperatura de um ambiente, modelado como uma única zona térmica, a partir de dados externos como a temperatura do ar e a radiação solar incidente.

No capítulo 4 apresenta-se a rotina computacional desenvolvida a partir do modelo físico. São apresentadas as simulações e ajustes efetuados com base em dados climáticos de Porto Alegre, para comportamentos típicos de inverno e de verão.

A partir dos dados obtidos no modelo real, após a devida adaptação de unidades e formatos para entrada na simulação, no capítulo 5 torna-se 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.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais e específicas, além de sugestões para continuidade das pesquisas e desenvolvimento da modelagem física e computacional.

No elenco de anexos incluem-se o algoritmo e a listagem do programa, bem como os arquivos de dados utilizados nas simulações.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

Com o objetivo de melhorar o potencial de utilização da produção agrícola em estufas, principalmente no que se refere ao aumento de produtividade, à otimização dos processos energéticos e ao controle de condições biológicas e climáticas adequadas, o estudo do comportamento climático das estufas com cobertura de polietileno tem sido objeto de inúmeras publicações científicas e tecnológicas.

De caráter genérico ou específico, estas publicações focam-se no estudo de particularidades como: o desempenho dos materiais empregados na construção de estufas; de sistemas de aquecimento e ventilação com construções simplificadas, pouco dispendiosas e de baixo consumo de complementações energéticas; ou ainda de processos mais amplos de monitoramento e controle computacional para determinação das condições climáticas no ambiente interno das estufas.

Neste capítulo, pretende-se apresentar uma síntese de algumas dessas publicações, dando especial ênfase à abordagem dada por cada autor à modelagem física e ao equacionamento adotado, aos resultados obtidos e às conclusões que, de alguma forma influenciaram e justificaram a modelagem adotada neste trabalho.

### **2.2. MODELAGEM DOS BALANÇOS DE ENERGIA**

Dentre as publicações encontradas 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, os quais são apresentados a seguir.

O modelo de Kimball (1972) apresenta um balanço de energia segmentado, ou seja, divide o "sistema estufa" em vários sub-sistemas acoplados obtendo equações de condução, convecção e radiação para sub-sistemas relativos à camada de solo interno, à cobertura vegetal, ao volume de ar interior, às superfícies internas e externas da cobertura da estufa e para o sistema de ventilação/evaporação/calefação. Aplicado e comparado com medições experimentais realizadas em 3 dias consecutivos (junho de 1970) em uma estufa localizada em Phoenix, Arizona, EUA, determina razoáveis resultados comparativos, justificando-os com a necessidade de estudos mais aprofundados para os fenômenos convectivos.

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, com e sem a presença de condensação de vapor de água nas superfícies da cobertura. Entre outras conclusões, os autores afirmam que a presença de condensação nas superfícies plásticas da estufa pode representar uma redução de até 33 % no fluxo radiante através das superfícies plásticas. Na figura 2.1, abaixo, é possível visualizar-se graficamente os termos utilizados na modelagem.

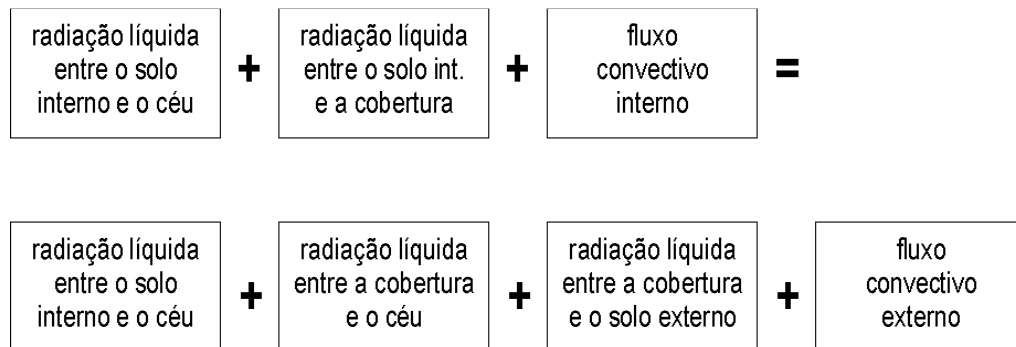


Fig. 2.1 – Representação gráfica do modelo de Garzoli et al. (1981)

Nijskens et al. (1984) apresentam um balanço de energia para as superfícies agrupando coeficientes de condução, convecção e radiação em uma única equação que é baseada na diferença de temperaturas internas e externas, conforme representação abaixo:

$$q = k \cdot \Delta T \quad \text{e} \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_0} + \sum_j \frac{e_j}{\lambda_j}} \quad (2.1)$$

onde

$q$	fluxo térmico nas superfícies da estufa [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$k$	coeficiente de proporcionalidade [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
$\alpha_i$ e $\alpha_0$	coeficiente de transferência nas superfícies int. e ext. [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
$e_j$	a espessura do material da cobertura [m]
$\lambda_j$	condutividade térmica do material da cobertura [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$\Delta T$	a diferença de temperaturas externa e interna [K]

O equacionamento proposto pelos autores é genérico e, para ser usado corretamente, depende do desmembramento dos termos relativos aos coeficientes de transferência de calor, não efetuados no trabalho, ou do conhecimento prévio das propriedades citadas.

O modelo de Frisina et al. (1998) descreve um balanço de energia simplificado para a cobertura vegetal e cita o método de Bowen para determinação dos fluxos de calor (convectivo) latente e sensível. Constatou-se ser um modelo muito simplificado, com termos muito genéricos, e com difícil aproveitamento para a modelagem esperada neste trabalho. No diagrama da figura 2.2 representa-se a modelagem utilizada pelos autores.

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{saldo de radiação} \\ \text{interna em ondas} \\ \text{longas e curtas} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo de} \\ \text{calor} \\ \text{no solo} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo convectivo} \\ \text{de calor} \\ \text{latente} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo convectivo} \\ \text{de calor} \\ \text{sensível} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{energia gasta} \\ \text{nos processos} \\ \text{fotossintéticos} \\ \hline \end{array} \approx 0$$

Fig. 2.2 – Representação gráfica da modelagem de Frisina et al. (1998).

O trabalho de Schneider (1994) foi desenvolvido para ambientes e edificações genéricas. O modelo apresentado na figura 2.3, 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.

#### Balanço de energia entre o ambiente externo e as superfícies

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo} \\ \text{condutivo} \\ \text{nas superfícies} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo convectivo} \\ \text{entre superf. ext.} \\ \text{e o ambiente ext.} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo radiativo} \\ \text{líquido em OC} \\ \text{nas superf. ext.} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo radiativo} \\ \text{líquido em OL} \\ \text{nas superf. ext.} \\ \hline \end{array}$$

#### Balanço de energia entre as superfícies e a zona interior

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo} \\ \text{condutivo} \\ \text{nas superfícies} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo convectivo} \\ \text{entre superf. int.} \\ \text{e zona} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo radiativo liq.} \\ \text{em OC entre as} \\ \text{superf. int. e a zona} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo radiativo liq.} \\ \text{em OL entre as} \\ \text{superf. int. e a zona} \\ \hline \end{array}$$

#### Balanço de energia na zona interior

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{calor} \\ \text{acumulado} \\ \text{na zona} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{fluxo convectivo} \\ \text{entre superf. int.} \\ \text{e zona} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{calor transferido} \\ \text{para a zona} \\ \text{por fluxo de massa} \\ \hline \end{array}$$

Fig. 2.3 – Diagrama representativo do modelo de Schneider (1994).

O modelo de Gonzales-Real (1996a) apresenta um balanço energético para estufas com cobertura de polietileno, com o objetivo de dimensionar as necessidades de aporte adicional de energia para calefação, baseado num modelo de comportamento "monozona". O modelo necessita da temperatura, velocidade e direção do ar externo; radiação solar incidente nas superfícies; temperatura do solo a uma profundidade de referência; da superfície total da estufa (solo e paredes), seu volume e da taxa de renovação de ar. Além desses parâmetros, é necessário conhecer os coeficientes de transferência de calor global, as propriedades radiantes dos materiais e superfícies e o comportamento difusivo do solo. A figura 2.1 apresenta graficamente a modelagem descrita.

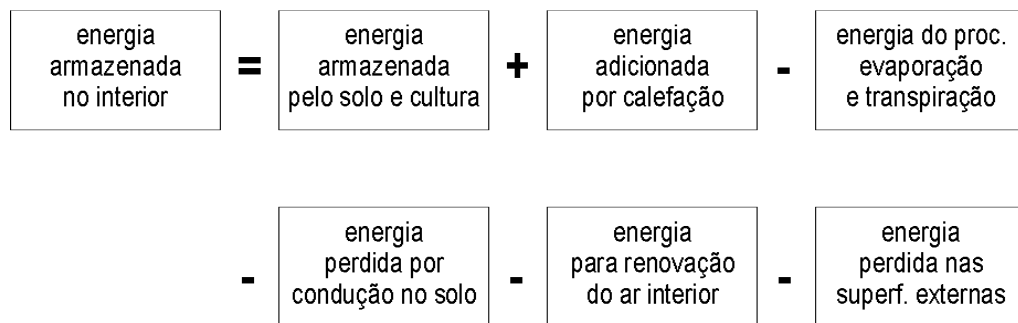


Fig. 2.4 – Diagrama representativo do modelo de Gonzales-Real (1996)

O modelo apresentado por Strand et al. (2001) também é desenvolvido para edificações genéricas. Com exceção da inclusão de termos relativos a fluxos radiantes, em ondas longas e curtas, devido a fontes internas, o modelo apresenta equacionamento do balanço de energia similar ao modelo de Schneider (1994).

Outros tipos de modelos, aplicados a situações específicas, podem ser encontrados nos trabalhos de Santamouris et al. (1995), que estudaram a arquitetura e o comportamento térmico de estufas com baixo consumo de energia; de Sentelhas et al. (1995), que apresentaram características climáticas específicas de ambientes para cultivo protegido; de Sutar et al. (1994), que desenvolveram um detalhado estudo numérico e analítico para estufas de vidro submetida a climas muito chuvosos, e de Vielmo et al. (1999), que apresentaram uma simulação numérica e propuseram melhoramentos aplicáveis a estufas de plasticultura de rosas, decorrente dos experimentos realizados na zona produtiva da serra do Rio Grande do Sul, onde foram obtidos os dados que serão utilizados na modelagem e simulação a que se propõe o presente trabalho.

Relativamente a estudos que envolvem processos de calefação para estufas, destacam-se os trabalhos de Martins et al. (1995), que avaliaram a temperatura interna de estufas aquecidas com fluxo de ar quente; de Santamouris et al. (1995), que apresentaram modelo de conservação de energia em estufa aquecida por tubos enterrados, e de Garcia (2001), que apresentou a simulação numérica de um sistema de calefação por tubos enterrados, aplicado em estufa da região focada na presente dissertação.

Sobre a presença e influência da condensação na superfície interna da cobertura das estufas cobertas com filme plástico, encontramos estudos desenvolvidos pelos pesquisadores Walker et al. (1971), Delwiche et al. (1984) e Pieters et al. (1996).

### **2.3. PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS SUPERFÍCIES**

A análise bibliográfica de Frisina et al. (1999) reporta-se para diversas pesquisas anteriores, determinando uma representatividade de 2 a 5 % do total, para a energia consumida em processos fotossintéticos, levando-a, nestes casos, a sua desconsideração quando se desenvolve modelos cujo grau de aproximação relativa é tolerável.

Seginer (1983) apresenta um estudo relativo ao dimensionamento da área considerada para efeito de absorção e reflexão dos fluxos térmicos internos pela camada vegetal (folhas), com experimento modelado para uma cultura de rosas em diversos estádios de crescimento. Este estudo é extremamente importante quando se deseja considerar a influência do calor latente do processo fotossintético no modelamento do balanço de energia, dando mais precisão ao modelo.

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. Afirma ainda que, quando não existe sistema de calefação de solo, a influência do fluxo térmico condutivo no solo interno da estufa esgota-se a profundidades da ordem de 0,15 m, 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 a evapo-transpiração da cobertura vegetal, aplica a metodologia baseada no coeficiente de Bowen relativo à espécie cultivada.

O trabalho de Pieters et al (1996) apresenta um completo estudo com relação aos diversos materiais que são utilizados na confecção de superfícies de estufas agrícolas, principalmente quanto as suas propriedades físicas em relação a radiação térmica em ondas curtas e longas. Sob este aspecto, cabe ressaltar que as propriedades citadas na publicação, relativas ao polietileno,

são as seguintes: emissividade em ondas longas (0,79); absorvidade para ondas curtas diretas (0,04) e difusas (0,13); transmissividade em ondas longas (0,18), curtas diretas (0,86) e difusas (0,71) e refletividade em ondas longas (0,03), curtas diretas (0,10) e difusas (0,16). Essas excelentes propriedades verificadas devem ser perseguidas para o polietileno empregado em estufas no Brasil, pois se aproximam muito das propriedades radiantes encontradas no vidro.

Num trabalho sobre as propriedades térmicas e ópticas dos materiais plásticos polietilênicos usualmente empregados na plasticultura brasileira, Schneider et al. (1998) identificaram que essas coberturas não são capazes de promover o efeito estufa desejado. Boa parte desses materiais analisados apresentam alta transmissividade para a faixa de comprimento de ondas curtas, o que é desejável, mas mantém altos valores de transmissividade para a faixa de ondas longas. Essa constatação explica o baixo rendimento das estufas com cobertura polietilênica, pois não são capazes de reter o calor absorvido durante o dia.

### 3. MODELAGEM FÍSICA

#### 3.1. INTRODUÇÃO

Nesse trabalho, as estufas com cobertura plástica, são consideradas como um tipo de edificação, cujas superfícies comportam-se como semi-transparentes, frente as componentes direta e difusa da radiação solar. Como base para desenvolvimento do modelo físico, foram adotadas as equações de balanço de energia para edificações aplicadas por Schneider (1994), adaptadas às características operativas das estufas, além das considerações sobre as trocas noturnas de energia térmica por radiações de ondas longas, entre o solo interior da estufa e o céu, referenciada em Garzoli et al. (1981). Estas últimas, justificam as observações de ocorrência de acentuadas diminuições de temperatura do ar no interior de estufas à noite, principalmente no inverno.

Desta forma, procedeu-se a modelagem da estufa 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.

#### 3.2. HIPÓTESES GERAIS ADOTADAS

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. Gonzales-Real (1996a) considera que o fluxo de calor por condução passa a ser pouco expressivo a partir de 0,15 m de profundidade;
- Para a radiação térmica em ondas longas, conforme a Lei de Kirschhof, a emissividade ( $\epsilon$ ) será considerada igual a absorvidade ( $\alpha$ ) 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, de forma esquemática, os fluxos térmicos presentes numa edificação tipo estufa com cobertura de material plástico semi-transparente e com espessura delgada, de modo que a condução de calor nessas superfícies seja considerada como em regime permanente, sem influência no comportamento térmico da edificação.

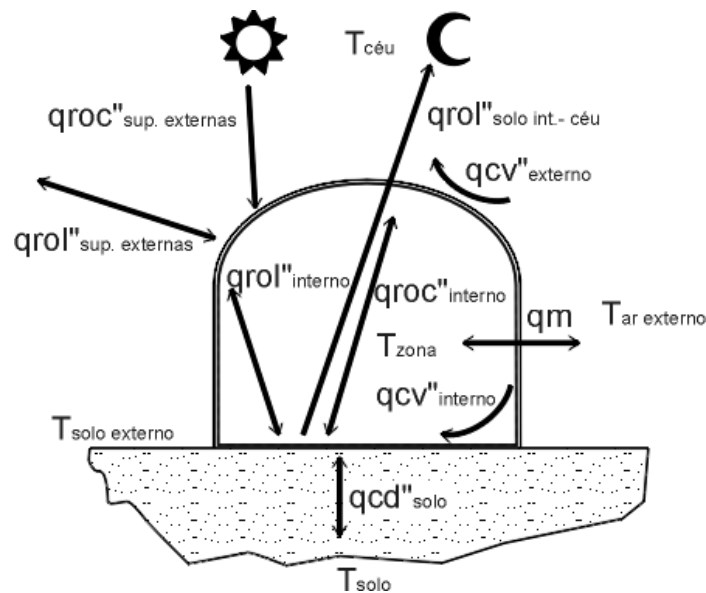


Fig. 3.1- Diagrama representativo dos fluxos térmicos na estufa

$qcv''_{\text{externo}}$	fluxo de calor convectivo nas superfícies externas [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$qcv''_{\text{interno}}$	fluxo de calor convectivo nas superfícies internas [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$qroc''_{\text{sup. externas}}$	fluxo de calor radiante em ondas curtas nas superfícies externas [ $\text{W.m}^{-2}$ ]



$q_{roc}''_{int\,erno}$	fluxo de calor radiante em ondas curtas trocado entre as superfícies internas [W.m <sup>-2</sup> ]
$q_{rol}''_{sup.\,externas}$	fluxo de calor radiante em ondas longas nas superfícies externas [W.m <sup>-2</sup> ]
$q_{rol}''_{int\,erno}$	fluxo de calor radiante em ondas curtas trocado entre as superfícies internas [W.m <sup>-2</sup> ]
$q_{rol}''_{solo\,int-céu}$	fluxo de calor radiante em ondas curtas longas entre o solo interno e o céu [W.m <sup>-2</sup> ]
$q_{cd}''_{solo}$	fluxo de calor condutivo no solo interno da estufa [W.m <sup>-2</sup> ]
$qm$	taxa de calor por transferência de massa térmica (infiltração) [ W ]
$T_{arexterno}$	temperatura do ar externo [K]
$T_{zona}$	temperatura do ar na zona interna da estufa [K]
$T_{céu}$	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]

### 3.3. BALANÇO DE ENERGIA PARA A ZONA INTERNA

A figura que segue apresenta esquematicamente os fenômenos térmicos considerados para a montagem do balanço de energia na zona interna.

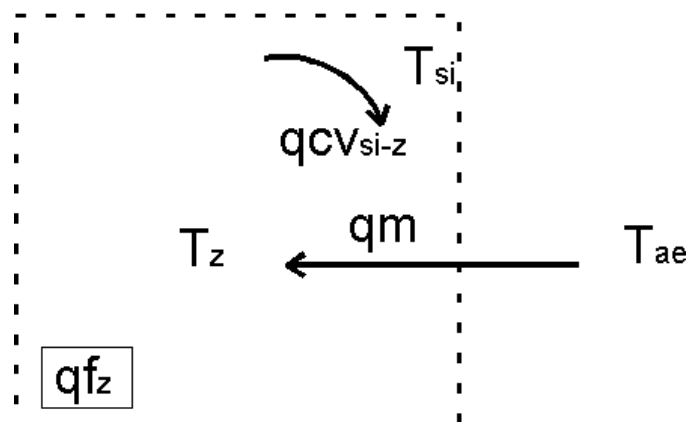


Fig. 3.2 - Diagrama representativo dos fluxos térmicos na zona interna

O balanço de energia é representado pela expressão abaixo:

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

onde:

$qac_z$  taxa de calor acumulado na zona [ W ]

$qcv_{si-z}$  taxa de calor transferida para zona por convecção [ W ]

$qf_z$  taxa de calor fornecido para a zona ou retirado por um sistema de climatização [ W ]

Desenvolvendo os termos da equação para as  $i$  superfícies, e considerando as propriedades termodinâmicas do ar constantes e iguais para os ambientes externos e internos, tem-se:

$$qac_z = \rho_{ar} \cdot cp_{ar} \cdot V \cdot \frac{dTz}{dt} \quad (3.2)$$

$$qcv_{si-z} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot hsi_z \cdot (Tsi_i - Tz) \quad (3.3)$$

$$qm = \dot{m} \cdot cp_{ar} \cdot (Tae - Tz) \quad (3.4)$$

$$\dot{m} = \rho_{ar} \cdot V \cdot \frac{nr}{3600} \quad (3.5)$$

onde:

$\dot{m}$  taxa de troca de massa de ar entre o ambiente externo e a zona [kg.s<sup>-1</sup>]

$\rho_{ar}$  massa específica do ar do ambiente externo e na zona [kg.m<sup>-3</sup>]

$cp_{ar}$  calor específico do ar do ambiente externo e na zona [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$V$  volume de ar da zona [m<sup>3</sup>]

$A_i$  área da superfície  $i$  [m<sup>2</sup>]

$hsiz$  coeficiente de troca de calor por convecção entre a superfície  $i$  e a zona [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]

$nr$  renovações do volume de ar na zona [h<sup>-1</sup>]

$T_{ae}$	temperatura do ar externo [K]
$T_{si}$	temperatura superficial interna de $i$ [K]
$T_z$	temperatura da zona [K]
$t$	tempo [s]
$i$	superfície em observação

Desenvolvendo-se o termo  $dT_z$  para  $T_z - T_{zo}$ , onde  $T_{zo}$  é a "temperatura do instante passado", obtém-se a equação genérica para o balanço de energia na zona:

$$\rho_{ar} \cdot c p_{ar} \cdot V \cdot \left( \frac{T_z - T_{zo}}{\Delta t} \right) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot h s i z_i \cdot (T_{s i} - T_z) + \dot{m} \cdot c p_{ar} \cdot (T_{ae} - T_z) + q f_z \quad (3.6)$$

Isolando-se  $T_z$  e utilizando-se a escritura matricial, tem-se:

$$T_z = \frac{\sum_{i=1}^n [A_i \cdot h s i z_i] \{T_{s i}\} + \frac{\rho_{ar} \cdot c p_{ar} \cdot V}{\Delta t} \cdot T_{zo} + \dot{m} \cdot c p_{ar} \cdot T_{ae} + q f_z}{\{A_i\} \cdot \{h s i z_i\} + \frac{\rho_{ar} \cdot c p_{ar} \cdot V}{\Delta t} + \dot{m} \cdot c p_{ar}} \quad (3.7)$$

sendo  $i=n$ , onde  $n$  é o número de superfícies:

$[A_i \cdot h s i z_i]$	matriz diagonal $n \times n$
$\{T_{s i}\}$	vetor $n \times 1$
$\{A_i\}$	vetor $1 \times n$
$\{h s i z_i\}$	vetor $n \times 1$

### 3.4. BALANÇO DE ENERGIA ENTRE AS SUPERFÍCIES INTERNAS E A ZONA

No esquema da figura 3.3 é apresentado o balanço de energia na superfície interna da cobertura da estufa.

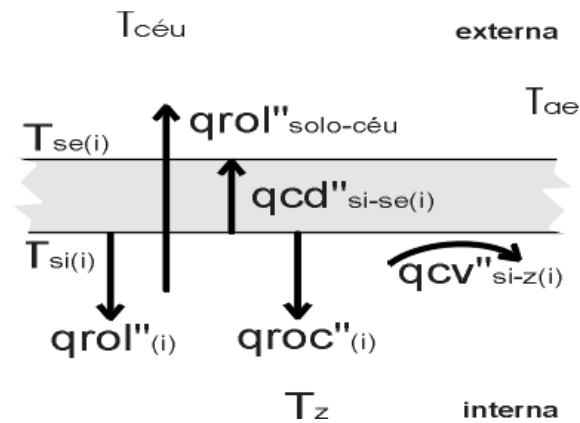


Fig. 3.3 – Representação gráfica do balanço de energia entre as superfícies internas e a zona interna

O balanço energético pode ser escrito na equação que segue:

$$q_{cd}''_{si-se(i)} = q_{cv}''_{si-z(i)} + q_{rol}''_i + q_{roc}''_i - q_{rol}''_{solo-céu} \quad (3.8)$$

onde:

- $q_{cd}''_{si-se}$  fluxo de calor condutivo entre as superfícies internas e externas [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
- $q_{cv}''_{si-z}$  fluxo de calor convectivo entre as superfícies internas e a zona [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
- $q_{rol}''$  fluxo de calor radiante líquido em ondas longas por unidade de superfície [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
- $q_{roc}''$  fluxo de calor radiante líquido em ondas curtas por unidade de superfície [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
- $q_{rol}''_{solo-céu}$  fluxo de calor radiante líquido em ondas longas entre o solo e o céu [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

A equação do termo condutivo pode ser apresentada da seguinte forma:

$$qcd_{si-se(i)}'' = -k_i \left( \frac{Tse_i - Tsi_i}{L_i} \right) = k_i \left( \frac{Tsi_i - Tse_i}{L_i} \right) \quad (3.9)$$

sendo

- $k$  condutividade térmica do material das superfícies [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]  
 $Tse, Tsi$  temperaturas externas e internas das superfícies [K]  
 $L$  espessura considerada para a superfície [m]

Utilizando-se matrizes, obtém-se a seguinte formatação:

$$[k/L]\{Tsi\} - [k/L]\{Tse\} \quad (3.10)$$

para:

- $[k/L]$  matriz diagonal  $n \times n$   
 $\{Tse\}$  vetor  $n \times 1$   
 $\{Tsi\}$  vetor  $n \times 1$

Para o termo convectivo, a equação pode ser apresentada como:

$$qcv_{si-z(i)}'' = hsi_z \cdot (Tsi_i - Tz) \quad (3.11)$$

Quando desenvolvida no formato matricial, obtém-se:

$$[hsiz]\{Tsi\} - [hsiz]\{Tz\} \quad (3.12)$$

- $[hsiz]$  matriz diagonal  $n \times n$   
 $\{Tsi\}$  vetor  $n \times 1$   
 $\{Tz\}$  vetor  $n \times 1$

A partir das hipóteses adotadas, entre as quais considerar-se como nula a radiação de ondas longas de origem externa incidente na zona, para obtenção do fluxo líquido de calor radiante em ondas longas determina-se o seguinte equacionamento:

$$qrol_{si-z(i)}^n = \varepsilon_{ol(i)} \cdot Eb_{ol(i)} - \alpha_{ol(i)} \cdot G_{ol(i)} \quad (3.13)$$

$$G_{ol(i)} = \sum_{j=1}^n F_{i-j} \cdot J_{ol(j)} \quad (3.14)$$

$$J_{ol(j)} = \varepsilon_{ol(j)} \cdot Eb_{ol(j)} + \rho_{ol(j)} \cdot G_{ol(j)} \quad (3.15)$$

$$Eb_{ol(i)} = \sigma \cdot Tsi_i^4 \quad (3.16)$$

onde

$\varepsilon_{ol}$	emissividade das superfícies internas para ondas longas
$Eb_{ol}$	emitância de corpo negro, em ondas longas, nas superfícies internas [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$\alpha_{ol}$	absortividade das superfícies internas para ondas longas
$G_{ol}$	irradiância em ondas longas para as superfícies internas [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$F_{i-j}$	fator de forma entre a superfícies internas $i$ para as superfícies internas $j$
$J_{ol}$	radiosidade em ondas longas das superfícies internas [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$\rho_{ol}$	reflectividade em ondas longas das superfícies internas
$\sigma$	constante de Stephan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )
$j$	demais superfícies da cavidade

Simplificando, o fluxo líquido é definido pela expressão:

$$qrol_{si-z(i)}^n = \varepsilon_{ol(i)} \cdot Eb_{ol(i)} - \alpha_{ol(i)} \cdot \sum_{j=1}^n F_{i-j} \cdot J_{ol(j)} \quad (3.17)$$

As trocas radiantes em ambientes, ou cavidades, podem ser modeladas pelo método das Radiosidades [Modest (1989)]. Empregando-se o delta de Kronecker, ( $\delta$ ), [Schneider (1994)], onde  $\delta = 1$  para  $i = j$  e  $\delta = 0$  para  $i \neq j$ , válido para superfícies internas e não côncavas, e considerando-se  $\alpha_{ol(i)} = \varepsilon_{ol(i)}$ , a equação anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$qrol_{si-z(i)}'' = (\delta_{ij} - \sum_{j=1}^n F_{i-j}) \cdot J_{ol(j)} \quad (3.18)$$

$$\sum_{j=1}^n (\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_j) F_{i-j}) \cdot J_{ol(j)} = \varepsilon_{ol(i)} \cdot Eb_{ol(i)} \quad (3.19)$$

Os termos das equações 3.18 e 3.19, respectivamente, podem ser apresentados da seguinte forma matricial:

$$\{qrol_{si-z}''\} = ([I] - [F]) \cdot \{J_{ol}\} \quad (3.20)$$

$$([I] - ([I] - [\varepsilon_{ol}]) \cdot [F]) \cdot \{J_{ol}\} = [\varepsilon_{ol}] \cdot \{\sigma \cdot Tsi^4\} \quad (3.21)$$

Operando-se matricialmente os termos das equações 3.20 e 3.21, obtém-se a matriz de Radiosidades internas para ondas longas (*MRI<sub>ol</sub>*), com o seguinte formato:

$$[MRI_{ol}] = ([I] - [F]) \cdot ([I] - ([I] - [\varepsilon_{ol}]) \cdot [F])^{-1} \cdot [\varepsilon_{ol}] \cdot [\sigma] \quad (3.22)$$

Finalmente, com a expressão abaixo, obtém-se o vetor do fluxo líquido de calor radiante para ondas longas como uma função das temperaturas das superfícies internas:

$$\{qrol_{si-z(i)}''\} = [MRI_{ol}] \cdot \{Tsi^4\} \quad (3.23)$$

onde

[I] matriz identidade n x n

[F] matriz n x n

[ $\varepsilon_{ol}$ ] matriz diagonal n x n

[ $\sigma$ ] matriz diagonal n x n

{ $J_{ol}$ } vetor n x 1

{ $Tsi^4$ } vetor n x 1

{*MRI<sub>ol</sub>*} matriz n x n

Considerando a ocorrência das chamadas "perdas noturnas" em ondas longas, conforme [Garzoli et al. (1981)], o termo relativo ao fluxo líquido de calor radiante (em ondas longas) entre o solo interno e o céu, pode ser representado pela seguinte expressão:

$$qrol''_{solo-céu} = F_{solo-céu} \cdot \varepsilon_{ol(solo)} \cdot \tau_{ol} \cdot \sigma \cdot (Tsi_{solo}^4 - T_{céu}^4) \quad (3.24)$$

onde

$F_{solo-céu}$	fator de forma entre a superfície do solo (interno) e o céu
$\tau_{ol}$	transmissividade do plástico para ondas longas
$T_{céu}$	temperatura celeste [K]
$solo$	índice relativo aos parâmetros para a superfície solo (interno)

Na forma matricial, utiliza-se um vetor  $\{qrol''_{solo-céu}\}$ , de dimensão  $n \times 1$ , onde todos os termos serão iguais a 0, exceto o termo relativo a superfície solo. Da mesma forma, as matrizes que compõem o equacionamento representado abaixo serão nulas, do tamanho  $n \times n$ , exceto o último termo da diagonal, que terá o valor de cada parâmetro, ou propriedade, relativo à superfície solo. Em consequência, para esta superfície obtém-se:

$$\{qrol''_{solo-céu}\} = [F_{solo-céu}] [\varepsilon_{ol(solo)}] [\tau_{ol}] [\sigma] (\{Tsi_{solo}^4\} - \{T_{céu}^4\}) \quad (3.25)$$

Não havendo emissão em ondas curtas, o fluxo líquido é obtido pela seqüência de expressões:

$$qroc''_{si-z} = \alpha_{oc(i)} \cdot G_{oc(i)} \quad (3.26)$$

$$J_{oc(i)} = \rho_{oc(i)} \cdot G_{oc(i)} + J_{oc(i)}^0 \quad (3.27)$$

$$J_{oc(i)}^0 = \tau_{dr(i)} \cdot G_{dr(i)}^0 + \tau_{df(i)} \cdot G_{df(i)}^0 \quad (3.28)$$

$$G_{oc(i)} = \sum_{j=1}^n F_{j-i} \cdot J_{oc(j)} \quad (3.29)$$



sendo

$\alpha_{oc(i)}$	absortividade para ondas curtas das superfícies internas
$G_{oc(i)}$	irradiância em ondas curtas nas superfícies internas [W.m <sup>-2</sup> ]
$J_{oc(i)}$	radiosidade em ondas curtas nas superfícies internas [W.m <sup>-2</sup> ]
$\rho_{oc(i)}$	refletividade para ondas curtas das superfícies internas
$J_{oc(i)}^0$	radiosidade primária em ondas curtas nas superfícies internas [W.m <sup>-2</sup> ]
$\tau_{dr(i)}$	transmissividade para ondas curtas direta nas superfícies internas
$\tau_{df(i)}$	transmissividade para ondas curtas difusa nas superfícies internas
$G_{dr(i)}^0$	irradiância em ondas curtas direta nas superfícies externas [W.m <sup>-2</sup> ]
$G_{df(i)}^0$	irradiância em ondas curtas difusa nas superfícies externas [W.m <sup>-2</sup> ]
$G_{oc(i)}^0$	irradiância total em ondas curtas de origem externa [W.m <sup>-2</sup> ]
$F_{j-i}$	fator de forma da superfície interna $j$ para a superfície internas $i$

Combinando as equações 3.27 e 3.29, adaptadas para os termos  $i$  e  $j$ , obtém-se:

$$G_{oc(i)} = \sum_{j=1}^n F_{j-i} \cdot (\rho_{oc(j)} \cdot G_{oc(j)} + J_{oc(j)}^0) \quad (3.30)$$

Analogamente ao aplicado para a ondas longas, utilizando-se o delta de Kronecker ( $\delta = I$  para  $i = j$ ), operando na forma matricial e isolando-se o termo  $G_{oc}$ , obtém-se:

$$\{G_{oc}\} = ([I] - [\rho_{oc}][F])^{-1} \cdot [F] \{J_{oc}^0\} \quad (3.31)$$

$$[MRI_{oc}] = ([I] - [\rho_{oc}][F]) \quad (3.32)$$

$$\{J_{oc}^0\} = [\tau_{dr}] \{G_{dr}^0\} + [\tau_{df}] \{G_{df}^0\} \quad (3.33)$$

$$\{groc_{si-z}^n\} = [\alpha_{oc}] \left( [MRI_{oc}]^{-1} \cdot [F] \left( [\tau_{dr}] \{G_{dr}^0\} + [\tau_{df}] \{G_{df}^0\} \right) \right) \quad (3.34)$$

onde

$[I]$	matriz identidade $n \times n$
$[\alpha_{oc}]$	matriz diagonal $n \times n$
$[\rho_{oc}]$	matriz diagonal $n \times n$
$[\tau_{dr}]$	matriz diagonal $n \times n$
$[\tau_{df}]$	matriz diagonal $n \times n$
$[F]$	matriz $n \times n$
$[MRI_{oc}]$	matriz $n \times n$
$\{J_{oc}^0\}$	vetor $n \times 1$
$\{G_{oc}^0\}$	vetor $n \times 1$
$\{G_{oc}\}$	vetor $n \times 1$
$\{G_{dr}^0\}$	vetor $n \times 1$
$\{G_{df}^0\}$	vetor $n \times 1$

Desta forma, representa-se a equação matricial para o balanço de energia entre as superfícies internas e a zona por:

$$\begin{aligned}
 [k/L]\{Tse\} - [k/L]\{Tsi\} &= [hsiz]\{Tsi\} - [hsiz]\{Tz\} + [MRI_{ol}] \cdot \{Tsi^4\} \\
 + [\alpha_{oc}][F][MRI_{oc}]^{-1} \cdot ([\tau_{dr}]\{G_{dr}^0\} + [\tau_{df}]\{G_{df}^0\}) &- [F_{solo-c\u00e9u}][\varepsilon_{ol(solo)}][\tau_{ol}][\sigma] (\{Tsi_{solo}^4\} - \{T_{c\u00e9u}^4\}) \quad (3.35)
 \end{aligned}$$

Para permitir o isolamento do vetor  $Tsi$ , utiliza-se linearização com uma matriz diagonal  $n \times n$  para temperaturas do "passado"  $Tsio^3$ , obtendo-se:

$$\begin{aligned}
 \{Tsi\} &= ([k/L] - [hsiz] - [MRI_{ol}][Tsio^3] + [F_{solo-c\u00e9u}][\varepsilon_{ol(solo)}][\tau_{ol}][\sigma]\{Tsio_{solo}^3\})^{-1} \cdot \\
 &\left( [k/L]\{Tse\} - [hsiz]\{Tz\} + [\alpha_{oc}][F][MRI_{oc}]^{-1} \cdot ([\tau_{dr}]\{G_{dr}^0\} + [\tau_{df}]\{G_{df}^0\}) + \right. \\
 &\left. [F_{solo-c\u00e9u}][\varepsilon_{ol(solo)}][\tau_{ol}][\sigma]\{Tc\u00e9u^4\} \right) \quad (3.36)
 \end{aligned}$$

### 3.5. BALANÇO DE ENERGIA DAS SUPERFÍCIES EXTERNAS

Na figura 3.4, são apresentados graficamente os fenômenos térmicos presentes nas superfícies externas.

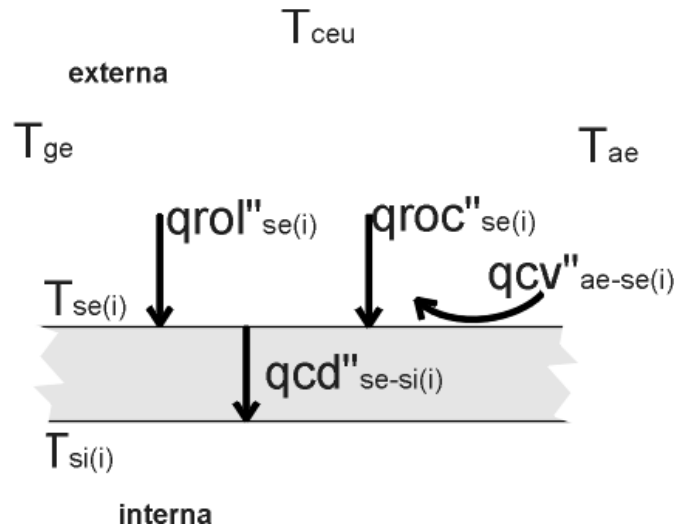


Fig. 3.4 - Diagrama do balanço de energia para as superfícies externas

É representado pela seguinte expressão:

$$q_{cd''_{se-si(i)}} = q_{cv''_{ae-se(i)}} + q_{rol''_{se(i)}} + q_{roc''_{se(i)}} \quad (3.37)$$

sendo

$q_{cd''_{se-si(i)}}$  - fluxo de calor condutivo entre as superfícies externas e internas [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$q_{cv''_{ae-se(i)}}$  - fluxo de calor convectivo para as superfícies externas [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$q_{rol''_i}$  - fluxo radiante líquido em ondas longas por superfície [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$q_{roc''_i}$  - fluxo radiante líquido em ondas curtas por superfície [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

Para o fluxo de calor condutivo, conforme hipóteses justificadas anteriormente, será usado o regime permanente.

$$qcd_{se-si(i)}'' = -k_i \left( \frac{Tsi_i - Tse_i}{L_i} \right) = k_i \left( \frac{Tse_i - Tsi_i}{L_i} \right) \quad (3.38)$$

Utilizando o formato matricial, sendo  $n$  o número de superfícies, obtém-se o seguinte formato:

$$[k/L]\{Tse\} - [k/L]\{Tsi\} \quad (3.39)$$

para

$$\begin{aligned} [k/L] & \quad \text{matriz diagonal } n \times n \\ \{Tse\} & \quad \text{vetor } n \times 1 \\ \{Tsi\} & \quad \text{vetor } n \times 1 \end{aligned}$$

Para o termo convectivo, a equação pode ser apresentada como:

$$qcv_{ae-se(i)}'' = haese_i (Tae - Tse_i) \quad (3.40)$$

onde

$$\begin{aligned} haese & \quad \text{coeficiente de troca de calor convectivo entre o ambiente externo e as} \\ & \quad \text{superfícies externas [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}] \\ Tae & \quad \text{temperatura do ambiente externo [K]} \end{aligned}$$

No formato matricial, observa-se:

$$[haese]\{Tae\} - [haese]\{Tse\} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} [haese] & \quad \text{matriz diagonal } n \times n \\ \{Tae\} & \quad \text{vetor } n \times 1 \\ \{Tse\} & \quad \text{vetor } n \times 1 \end{aligned}$$

Para a definição dos termos relativos aos fluxos líquidos de calor radiantes, também valem as hipóteses aplicadas para as superfícies internas. Portanto, para obtenção do fluxo líquido de calor relativo a radiação em ondas longas usa-se a seguinte seqüência:

$$q_{rol_{se(i)}} = \varepsilon_{ol(i)} \cdot F_{i-ceu} \cdot \sigma \cdot (T_{se_i}^4 - T_{ceu}^4) + \varepsilon_{ol(i)} \cdot F_{i-ae} \cdot \sigma \cdot (T_{se_i}^4 - T_{ae}^4) + \varepsilon_{ol(i)} \cdot F_{i-ge} \cdot \sigma \cdot (T_{se_i}^4 - T_{ge}^4) \quad (3.42)$$

onde

$F_{i-ceu}$	fator de forma entre as superfícies externas e o céu
$F_{i-ae}$	fator de forma entre as superfícies externas e o ambiente externo
$F_{i-ge}$	fator de forma entre as superfícies externas e o solo externo
$\sigma$	constante de Stephan-Boltzmann (= $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ])
$T_{ceu}$	temperatura celeste [K]
$T_{ae}$	temperatura do ambiente externo [K]
$T_{ge}$	temperatura do solo exterior a estufa [K]

No formato matricial, a equação pode ser apresentada como:

$$\{q_{rol}\} = [\varepsilon_{ol}] [\sigma] \left( [F_{i-ceu}] \{T_{se}^4\} - [F_{i-ceu}] \{T_{ceu}^4\} \right) + [\varepsilon_{ol}] [\sigma] \left( [F_{i-ae}] \{T_{se}^4\} - [F_{i-ae}] \{T_{ae}^4\} \right) + [\varepsilon_{ol}] [\sigma] \left( [F_{i-ge}] \{T_{se}^4\} - [F_{i-ge}] \{T_{ge}^4\} \right) \quad (3.43)$$

quando

$[\varepsilon_{ol}]$	matriz diagonal $n \times n$
$[\sigma]$	matriz diagonal $n \times n$
$[F_{i-ceu}]$	matriz diagonal $n \times n$

$[F_{i-ae}]$	matriz diagonal $n \times n$
$[F_{i-ge}]$	matriz diagonal $n \times n$
$\{T_{se}^4\}$	vetor $n \times 1$
$\{T_{ceu}\}$	vetor $n \times 1$
$\{T_{ae}\}$	vetor $n \times 1$
$\{T_{ge}\}$	vetor $n \times 1$

Para o fluxo de radiação em ondas curtas o equacionamento será:

$$q_{roc}''_{se} = \alpha_{oc(i)} \cdot G_{oc(i)}^e \quad (3.44)$$

$$G_{oc(i)}^e = G_{dr(i)}^e + G_{df(i)}^e \quad (3.45)$$

onde

$\alpha_{oc}$	absortividade para ondas curtas nas superfícies externas
$G_{oc}^e$	irradiância total nas superfícies externas [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$G_{dr}^e$	irradiância direta nas superfícies externas [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$G_{df}^e$	irradiância difusa nas superfícies externas [ $W \cdot m^{-2}$ ]

Na forma matricial, representa-se:

$$\{G_{oc}^e\} = \{G_{dr}^e\} + \{G_{df}^e\} \quad (3.46)$$

$$\{q_{roc}''_{oc}\} = [\alpha_{oc}] \cdot \{G_{oc}^e\} \quad (3.47)$$

quando

$\{G_{oc}^e\}$	vetor $n \times 1$
$\{G_{dr}^e\}$	vetor $n \times 1$

$\{G_{df}^e\}$             vetor  $n \times 1$   
 $[\alpha_{oc}]$             matriz diagonal  $n \times n$

Em conseqüência, representa-se a equação geral para o balanço de energia nas superfícies externas pela expressão:

$$\begin{aligned}
 [k/L]\{Tse\} - [k/L]\{Tsi\} &= [haese]\{Tae\} - [haese]\{Tse\} + \\
 [\varepsilon_{ol}][\sigma]([F_{i-ceu}]\{Tse^4\} - [F_{i-ceu}]\{Tceu^4\}) &+ [\varepsilon_{ol}][\sigma]([F_{i-ae}]\{Tse^4\} - [F_{i-ae}]\{Tae^4\}) \\
 + [\varepsilon_{ol}][\sigma]([F_{i-ge}]\{Tse^4\} - [F_{i-ge}]\{Tge^4\}) &+ [\alpha_{oc}]\{G_{oc}^e\}
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Para obter-se o vetor das  $Tse$ , utiliza-se o processo de linearização com uma matriz diagonal  $n \times n$  para uma temperatura de entrada  $Tseo^3$ . Desta forma, o resultado obtido passa a ser:

$$\begin{aligned}
 \{Tse\} &= ([k/L] + [Haese] - ([\varepsilon_{ol}][\sigma][Tseo^3]([F_{i-ceu}] + [F_{i-ae}] + [F_{i-ge}])))^{-1} \cdot \\
 ([k/L]\{Tsi\} + [Haese]\{Tae\} - [\varepsilon_{ol}][\sigma]([F_{i-ceu}]\{Tceu^4\} &+ [F_{i-ae}]\{Tae^4\} + [F_{i-ge}]\{Tge^4\})) + [\alpha_{oc}]\{G_{oc}^e\}
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

Portanto, na forma matricial, tendo as incógnitas como variáveis de acoplamento, a modelagem física adotada para a rotina computacional desenvolvida no capítulo seguinte, será representada pelas seguintes equações:

- Para a zona

$$Tz = \frac{\sum_{i=1}^n [A_i \cdot hsz_i]\{Tsi_i\} + \frac{\rho_{ar} \cdot cp_{ar} \cdot V}{dt} \cdot Tzo + \dot{m} \cdot cp_{ar} \cdot Tae + qf_z}{\{A_i\} \cdot \{hsz_i\} + \frac{\rho_{ar} \cdot cp_{ar} \cdot V}{dt} + \dot{m} \cdot cp_{ar}} \tag{3.50}$$

- Para as superfícies internas

$$\{Tsi\} = \left( [k/L] - [hsiz] - [MRI_{ol}] [Tsi_o^3] + [F_{solo-c\u00e9u}] [\varepsilon_{ol(solo)}] [\tau_{ol}] [\sigma] \{Tsi_{solo}^3\} \right)^{-1}. \quad (3.51)$$

$$\left( [k/L] \{Tse\} - [hsiz] \{Tz\} + [\alpha_{oc}] \left( [F] [MRI_{oc}]^{-1} \cdot ([\tau_{dr}] \{G_{dr}^0\} + [\tau_{df}] \{G_{df}^0\}) \right) + [F_{solo-c\u00e9u}] [\varepsilon_{ol(solo)}] [\tau_{ol}] [\sigma] \{Tc\u00e9u^4\} \right)$$

- Para as superf\u00edcies externas

$$\{Tse\} = \left( [k/L] + [Haese] - ([\varepsilon_{ol}] [\sigma] [Tseo^3] ([F_{i-ceu}] + [F_{i-ae}] + [F_{i-ge}])) \right)^{-1}.$$

$$\left( [k/L] \{Tsi\} + [Haese] \{Tae\} - [\varepsilon_{ol}] [\sigma] \left( [F_{i-ceu}] \{Tceu^4\} + [F_{i-ae}] \{Tae^4\} + [F_{i-ge}] \{Tge^4\} \right) + [\alpha_{oc}] \{G_{oc}^e\} \right) \quad (3.52)$$

### 3.6. CONCLUS\u00d5ES

Com o equacionamento adotado, focando-se nas vari\u00e1veis que representam temperaturas, \u00e9 poss\u00edvel concluir que na modelagem desenvolvida a temperatura das superf\u00edcies externas \u00e9 fun\u00e7\u00e3o das temperaturas das superf\u00edcies internas, do ambiente externo, do solo externo e do c\u00e9u; a temperatura das superf\u00edcies internas \u00e9 fun\u00e7\u00e3o das temperaturas das superf\u00edcies externas, da zona e do c\u00e9u; a temperatura da zona \u00e9 fun\u00e7\u00e3o das temperaturas do ambiente externo, das superf\u00edcies internas e da zona (num tempo passado).

Sendo conhecidos os valores da radia\u00e7\u00e3o solar, direta e difusa, incidente nas superf\u00edcies externas da estufa e a temperatura do ambiente externo, consideradas as hip\u00f3teses iniciais, al\u00e9m de definir comportamentos esperados para a temperatura do solo externo e do c\u00e9u, restam como inc\u00f3gnitas  $\{Tse\}$ ,  $\{Tsi\}$  e  $\{Tz\}$ . A solu\u00e7\u00e3o pode ser obtida de diversas maneiras, mas foi escolhido o m\u00e9todo iterativo de Gauss-Seidel, para elabora\u00e7\u00e3o da rotina computacional, objeto do cap\u00edtulo seguinte, arbitrando-se valores iniciais para  $Tse$ ,  $Tsi$  e  $Tzo$ .



## 4. DESENVOLVIMENTO DA ROTINA COMPUTACIONAL

### 4.1. INTRODUÇÃO

Com base no modelo físico apresentado anteriormente, para simular o comportamento térmico da estufa, 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 a 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.

Inicialmente, a rotina computacional é apresentada e descrita em detalhes, para, finalmente, se chegar a exploração de alguns resultados, que servirão para verificar a coerência esperada, relativa ao comportamento térmico de estufas com cobertura plástica.

### 4.2. DESCRIÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL

A rotina tem como objetivo principal a solução das equações 3.50 , 3.51 e 3.52.

A rotina 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.

O fluxograma representado na figura 4.1 sintetiza os cinco módulos que compõem a rotina computacional desenvolvida.

O algoritmo e a listagem da rotina computacional são apresentados nos anexos 1 e 2, respectivamente, assim como a função específica de cada módulo da rotina, cujas características principais são descritas nos subitens a seguir.

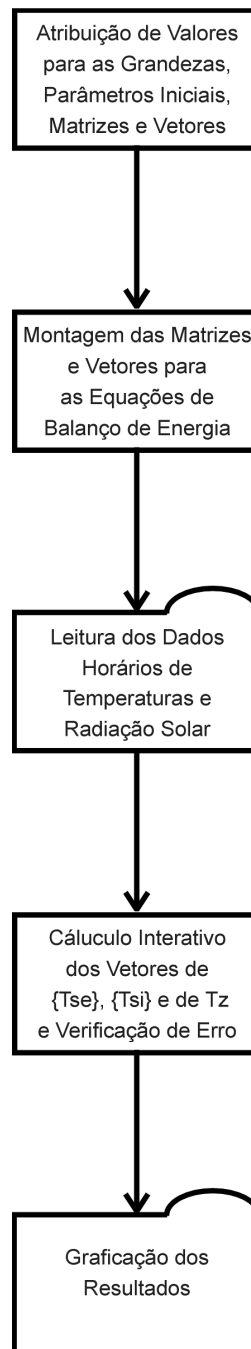


Fig. 4.1 – Fluxograma simplificado da rotina computacional

#### 4.2.1. MÓDULO DE ATRIBUIÇÃO DE VALORES FIXOS

Esse módulo tem como finalidade definir os parâmetros utilizados na rotina. Seus elementos mais importantes são apresentados a seguir:

- tempo=3600 s – passo de tempo de simulação;
- $\rho_{ar}=1,185 \text{ kg.m}^{-3}$  – massa específica do ar a 300 K;
- $c_{par}=1006 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  – calor específico do ar a 300 K;
- $n_{ar}=1$  – renovações horárias do volume de ar da estufa por infiltração [1 / 3600 s];
- larg=30 m – largura da estufa;
- prof=50 m – profundidade da estufa;
- $al_{tef}=4 \text{ m}$  – altura média (para efeito de volume de ar) da estufa, considerando a cobertura em forma de arco;
- $n=6$  – número de superfícies;
- $h_i=2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  – valor médio atribuído ao coeficiente de troca de calor por convecção entre as superfícies internas e a zona;
- $h_e=5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  – valor médio atribuído ao coeficiente de troca de calor por convecção entre as superfícies externas e a vizinhança;
- $h_{ig}=1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  – valor médio atribuído ao coeficiente de troca de calor por convecção entre a zona e o solo interno;

Aplicando-se o equacionamento indicado por Incropera et al. (1998), as tabelas que se-guem apresentam os valores calculados para o coeficiente de transferência de calor por convecção no ambiente interno da estufa ( $h_i$ ), considerando superfícies verticais (tabela 4.1) e horizontais (tabela 4.2) operando em regime de convecção natural.

Tab. 4.1 – Cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção para as superfícies verticais

Num. de Prandt	k do ar ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	Num. de Rayleigh	Num. Nusselt	coef. de convec. ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
		L = 4 m	Sup. Vert.	$hV$
0.707	0.0263	0.00E+00	0.7	0.01
0.707	0.0263	5.90E+09	180.7	1.58
0.707	0.0263	1.18E+10	224.7	1.97
0.707	0.0263	1.77E+10	255.3	2.24
0.707	0.0263	2.36E+10	279.7	2.45
0.707	0.0263	2.95E+10	300.2	2.63
0.707	0.0263	3.54E+10	318.1	2.79
0.707	0.0263	4.13E+10	334.1	2.93
0.707	0.0263	4.72E+10	348.6	3.06
0.707	0.0263	5.31E+10	361.9	3.17

Para a superfície horizontal interna, a tabela 4.2 considerou-se dois equacionamentos. O primeiro coeficiente (h sup. fria) foi obtido considerando a superfície plástica com temperatura mais fria que a do ar da zona. O outro coeficiente (h sup. quente) refere-se a situação inversa, ou seja, temperatura da superfície interna mais quente que a do ar no interior da estufa.

Em ambos dimensionamentos utilizou-se número de Prandt para o ar igual 0,707 e condutibilidade térmica do ar (k) igual a  $0,0263 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Tab. 4.2 – Cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção para a superfície horizontal.

dif. Temp.(K)	num. de Prandt	$k_{ar}(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$	num. de Rayleigh		num. Nusselt		coef. de convecção ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )	
			L = área sup./perímetro=9 m	Sup. fria	Sup. quente	h sup. fria	h sup. quente	
0	0.707	0.0263	0	0.0	0.0	0.00	0.00	
1	0.707	0.0263	6.72E+10	609.7	137.4	1.78	0.40	
2	0.707	0.0263	1.34303E+11	768.2	163.5	2.24	0.48	
3	0.707	0.0263	2.01455E+11	879.3	180.9	2.57	0.53	
4	0.707	0.0263	2.68607E+11	967.8	194.4	2.83	0.57	
5	0.707	0.0263	3.35758E+11	1042.6	205.5	3.05	0.60	
6	0.707	0.0263	4.0291E+11	1107.9	215.1	3.24	0.63	
7	0.707	0.0263	4.70062E+11	1166.3	223.6	3.41	0.65	
8	0.707	0.0263	5.37213E+11	1219.4	231.2	3.56	0.68	
9	0.707	0.0263	6.04365E+11	1268.2	238.1	3.71	0.70	
10	0.707	0.0263	6.71517E+11	1313.5	244.4	3.84	0.71	

A magnitude dos valores apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2, permitem concluir que os valores dos coeficientes de transferência de calor, em regime de convecção natural, são muito pequenos. Esse comportamento se repete nas duas situações propostas.

O valor médio do coeficiente de transferência de calor por convecção para as superfícies internas, adotado neste trabalho, será de  $2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , que representa o comportamento médio para as circunstâncias em que opera a estufa, além de admitir a influência de uma movimentação adicional do ar interior, pelo efeito da infiltração.

Para os coeficientes de transferência de calor por convecção para as superfícies externas, adotou-se as formulações de Sparrow e Mitchell, referenciados em Duffie et al. (1990). Sparrow apresenta um equacionamento para o cálculo de coeficientes de convecção, em regime natural, para placas planas com áreas pequenas (da ordem de  $10 \text{ m}^2$ ). Mitchell aplica o efeito da influência do vento na edificação, considerando-a como uma esfera, cujo diâmetro é a raiz cúbica do volume da edificação. Para baixas velocidades do vento, como no presente caso, a mesma literatura também recomenda a utilização do equacionamento referenciado na tabela 4.2, onde o parâmetro que influencia o cálculo passa a ser o diferencial de temperatura entre o ar e superfície

externa. Recomenda ainda a utilização de  $h_{ext}$  da ordem de  $4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  para diferenciais de temperatura de  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Na tabela 4.3 são apresentados valores para o coeficiente de transferência de calor por convecção, para o lado externo da estufa, obtidos com a utilização das formulações Sparrow e de Mitchell.

Tab. 4.3 – Coeficiente de transferência de calor por convecção externo pelas formulações de Sparrow e Mitchell.

Velocidade do Vento ( $\text{m.s}^{-1}$ )	Formulação de Sparrow	Formulação de Mitchell
	$h_e$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )	$h_e$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
0	0.0	0.0
1	0.7	2.6
2	1.0	4.0
3	1.2	5.1
4	1.4	6.0
5	1.6	6.9
6	1.8	7.7
7	1.9	8.4
8	2.0	9.1
9	2.1	9.8
10	2.3	10.4
11	2.4	11.0
12	2.5	11.6

Dados relativos a velocidade do vento para os períodos utilizados na simulação, numa amostragem de 996 medições, indicam valores entre 0 e  $11,8 \text{ m.s}^{-1}$ , com média de  $3,1 \text{ m.s}^{-1}$ .

Portanto, após avaliar-se todas as recomendações e formulações da literatura referenciada, adotar-se um  $h_{ext}$  com valores iguais a  $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , similar ao calculado pela correlação de Mitchell, significa aplicar ao modelo um valor que representa, com alguma folga em relação as demais metodologias sugeridas, as circunstâncias médias em que opera a estufa. Ou seja, diferenças de temperatura de ordem de  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e velocidade do vento de  $3 \text{ m.s}^{-1}$ .

Este módulo atribui, ainda os seguintes parâmetros:

- $k_p=0,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$  – condutividade térmica do polietileno das superfícies da cobertura;
- $k_g=1,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$  – condutividade térmica do solo, conforme Gonzales-Real (1996) igual a 1 para solos secos e 2 para solos úmidos;
- $l_p=0,0001 \text{ m}$  – espessura do plástico
- $l_g=0,15 \text{ m}$  – espessura considerada para a camada condutiva do solo

- $t_i=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  – temperaturas iniciais na simulação;
- $Q_{fz}=0\text{ W}$  – taxa de calor (de diversas fontes, exceto radiação solar) que pode ser fornecida ou retirada da zona;
- $\text{emol}=0,1$  – emissividade em ondas longas das superfícies plásticas e 0,8 para o solo;
- $\text{absoc}=0,1$  – absortividade em ondas curtas das superfícies plásticas e 0,8 para o solo;
- $\text{toc}=0,8$  – transmissividade em ondas curtas das superfícies plásticas e 0 para o solo;
- $\text{tol}=0,8$  – transmissividade em ondas longas das superfícies plásticas e 0 para o solo;
- F – representa os fatores de forma entre as superfícies internas calculados conforme as dimensões da estufa e o equacionamento para superfícies perpendiculares e paralelas [Modest (1989)], cujos resultados são mostrados na tabela 4.4 a seguir.

Tab. 4.3 – Fatores de forma para as superfícies internas do modelo

Superfícies Ortogonais com Aresta Comum								
w	h	l	H	W	Fator =	valor	Fator =	valor
50	30	4	7.500	12.500	F 1-3	0.043	F 3-1	0.071
50	30	4	7.500	12.500	F 1-4	0.043	F 4-1	0.071
4	30	50	0.600	0.080	F 1-5	0.435	F 5-1	0.058
4	30	50	0.600	0.080	F 1-6	0.435	F 6-1	0.058
50	30	4	7.500	12.500	F 2-3	0.043	F 3-2	0.071
50	30	4	7.500	12.500	F 2-4	0.043	F 4-2	0.071
4	30	50	0.600	0.080	F 2-5	0.435	F 5-2	0.058
4	30	50	0.600	0.080	F 2-6	0.435	F 6-2	0.058
4	50	30	1.667	0.133	F 3-5	0.422	F 5-3	0.034
4	50	30	1.667	0.133	F 3-6	0.422	F 6-3	0.034
4	50	30	1.667	0.133	F 4-5	0.422	F 5-4	0.034
4	50	30	1.667	0.133	F 4-6	0.422	F 6-4	0.034
Superfícies Iguais e Opostas								
x	y	l	X/L	Y/L	Fator =	valor	Fator =	valor
50	4	30	1.667	0.133	F 1-2	0.044	F 2-1	0.044
30	4	50	0.600	0.080	F 3-4	0.014	F 4-3	0.014
30	50	4	7.500	12.500	F 5-6	0.816	F 6-5	0.816
Áreas	A1	A2	A3	A4	A5	A6		
m <sup>2</sup>	200.0	200.0	120.0	120.0	1500.0	1500.0		

#### 4.2.2. MONTAGEM DAS MATRIZES E VETORES

Este módulo tem como finalidade dimensionar, formatar e atribuir valores às matrizes e aos vetores constituídos pelos elementos apresentados no item anterior, bem como prepara as matrizes e vetores das variáveis de cálculo.

### 4.2.3. MÓDULO DE LEITURA DE DADOS HORÁRIOS

Nesse módulo são concatenados os valores dos dados provenientes de diferentes arquivos de informações, organizados em base horária. Os dados são a temperatura do ar exterior e as componentes direta e difusa da radiação solar, em diferentes superfícies orientadas.

### 4.2.4. MÓDULO DE CÁLCULO DAS TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES EXTERNAS, INTERNAS E DA ZONA.

Trata-se do módulo mais importante, pois nele são calculados as incógnitas  $\{T_{se}\}$ ,  $\{T_{si}\}$  e  $T_z$  do problema acoplado. As equações 3.50, 3.51 e 3.52 são resolvidas pelo método de Gauss-Seidel, a partir de valores iniciais arbitrados para as temperaturas das superfícies e da zona.

A convergência é verificada a partir da satisfação de um critério (saldo de 0,0001), aplicado ao resíduo dos balanços de energia.

### 4.2.5. GRAFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Este módulo tem como finalidade apresentar graficamente as temperaturas da zona (medidas e calculadas pela rotina) e as temperaturas do ambiente externo à estufa, para os períodos em horas utilizados na simulação. Foi elaborado com auxílio dos comandos de graficação do Mat Lab 5.3.

## 4.3. PREPARAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

Para proceder-se à análise de consistência e aos ajustes necessários durante a elaboração da rotina computacional, utilizou-se um arquivo de dados relativos a Porto Alegre. Trata-se de um arquivo tipo TRY (teste reference year), elaborado em parte pela Estação Meteorológica do Aeroporto Salgado Filho (Porto Alegre – RS - Brasil) e de dados de radiação solar para Porto Alegre, em separado. Os arquivos de dados meteorológicos TRY são seqüências anuais reais, retirados da observação de mais de 10 anos, capazes de representar as situações do clima de Porto Alegre de forma não extremada. Ao todo são 8760 horas, descritos da seguinte forma:

- coluna 1 – hora;
- coluna 2 – dia;

- coluna 3 – mês;
- coluna 4 – radiação solar total incidente no plano horizontal [ $\text{KJ.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ];
- coluna 5 – velocidade do vento [ $\text{m.s}^{-1}$ ];
- coluna 6 – temperatura do ar (bulbo seco) [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- coluna 7 – temperatura no termômetro de bulbo úmido [ $^{\circ}\text{C}$ ].

O arquivo TRY fornece dados de radiação solar total medida no plano horizontal. Para passá-los para os diversos planos inclinados da estufa, e decompô-los em suas componentes direta e difusa, empregou-se a rotina "processador solar" do TRNSYS.15. Ainda foram usadas, do mesmo programa, as rotinas de cálculo de temperatura de céu e de umidade relativa. Uma captura de tela mostrando a montagem dessas rotinas no TRNSYS.15 é apresentada na figura 4.2.

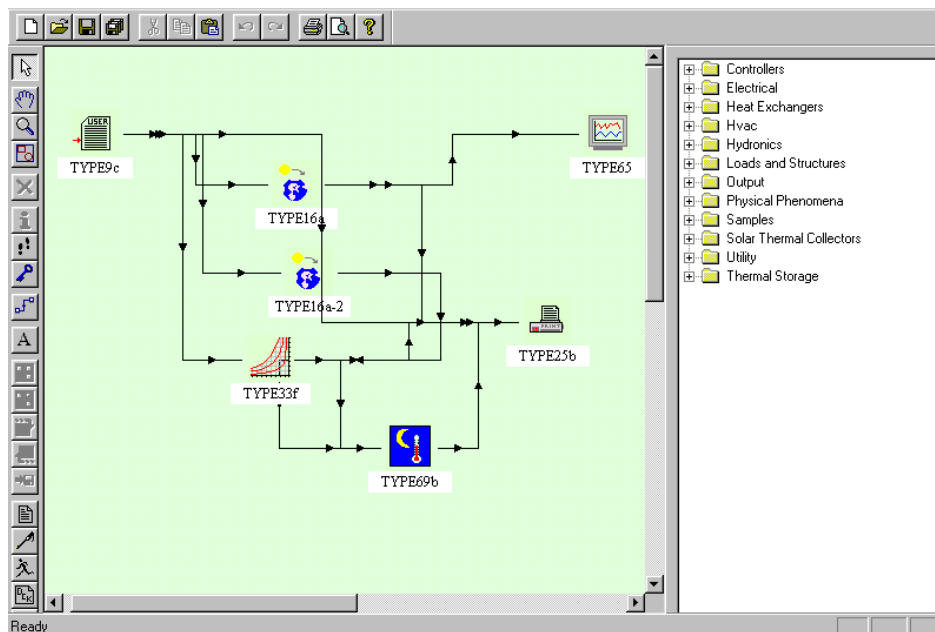


Fig. 4.2 – Tela da rotina para processamento do arquivo TRY no TRNSYS.15.

Os elementos empregados são descritos a seguir:

- type 9c – leitor de arquivos de dados;
- type 16a e 16a2 – processadores de radiação solar (função da radiação solar incidente na horizontal, dos ângulos de zenith e azimutais das superfícies, da data relativa ao ano solar e da latitude);
- type 33f – carta psicrométrica (função das temperaturas de bulbo seco e úmido);



- type 69b – processador de temperatura celeste e densidade de nuvens (função da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa do ar);
- type 65 – graficador para tela;
- type 25b – processador de saída de dados em arquivo .txt.

#### 4.3.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O APLICATIVO TRNSYS.15

O programa TRNSYS (“tran-sis”) está disponível comercialmente desde de 1975 e foi desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (SEL) da Universidade de Wisconsin nos Estados Unidos com o intuito de simular o desempenho transiente de sistemas térmicos.

A mais recente versão disponível é a TRNSYS.15, lançada em 2000. A versão TRNSYS 14.2 com IISiBat, lançada em 1996, tornou-se possível após a união de esforços de vários laboratórios de diferentes países no sentido de adaptar o TRNSYS 14.1 que funcionava apenas em ambiente DOS. O TRNSYS 14.2 apresentou a compatibilidade com as plataformas Windows 95 e Windows NT. Esta compatibilidade foi possível graças à inserção do programa TRNSYS dentro do pacote IISiBat, uma interface gráfica desenvolvida para o funcionamento com qualquer programa de simulação, projetado pelo Centro Científico e Tecnológico de Edificações (CSTB), localizado na França.

O TRNSYS.15 é um programa de simulação transiente com estrutura modular. Sua natureza modular lhe confere grande flexibilidade, e facilita a adição de modelos não incluídos na biblioteca padrão do programa. O TRNSYS.15 adapta-se bem a análise de sistemas cujo comportamento é dependente da passagem do tempo.

O modo de funcionamento do TRNSYS.15 é baseado em um programa principal que organiza a ligação e a concatenação de subrotinas ou módulos, que representam os modelos de componentes do sistema.

O módulo, ou *TYPE*, é um componente que pode corresponder a: um sistema térmico completo (uma edificação, uma instalação solar,...); um equipamento térmico (coletor solar, bomba, trocador de calor,...); um utilitário térmico (cálculo da umidade do ar, cálculo da radiação incidente sobre uma determinada superfície,...); um utilitário matemático (integrador, cálculo de equações diferenciais,...) ou um utilitário de apresentação (impressão de resultados, plotagem de gráficos,...).

O *TYPE* é uma subrotina escrita em linguagem FORTRAN como um elemento ao qual podem chegar entradas (*inputs*) e de onde podem partir saídas (*outputs*). Paralelamente, associam-se parâmetros relacionados ao sistema, fenômeno ou utilitário representado.

As entradas são as solicitações que o componente recebe e que evoluem em função do tempo. As saídas caracterizam a resposta do componente a estas solicitações. São calculadas em função das entradas e dos parâmetros. Os parâmetros são os valores que permanecem constantes ao longo de toda a simulação. Em geral, estas são as características termo-físicas do componente descrito pelo módulo.

O **IISiBat3**, Interface Inteligente para Simulação de Edificações, é um ambiente geral de simulação que foi adaptado para acolher o programa de simulação TRNSYS. Devido a sua natureza flexível, muitas ferramentas e programas utilitários podem funcionar dentro do grupo IISiBat3. Os sistemas a serem simulados são montados no IISiBat3 a partir da utilização de ícones na Janela de Montagem (figura 4.2). Estes ícones representam os *TYPES* do programa TRNSYS, ligados de forma a garantir um fluxo de informações.

#### 4.4. OS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Aplicando-se à rotina computacional desenvolvida os dados relativos a condições meteorológicas típicas do verão de Porto Alegre, obtém-se os resultados de temperatura representados na figura 4.3, para o comportamento das temperaturas do ar na zona interna da estufa comparativamente com as temperaturas do ar no lado exterior à estufa.

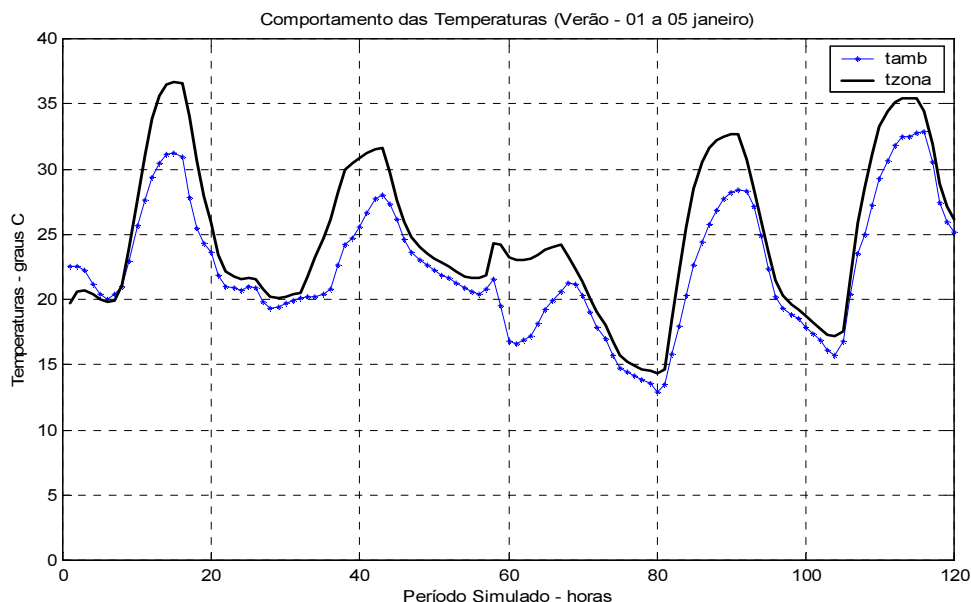


Fig. 4.3 – Simulação da temperatura do ar na zona (tzona) e da temperatura do ar no ambiente externo (tamb) para dados relativos ao período de 01 a 05 de janeiro.

Esta simulação foi realizada utilizando valores de temperatura celeste calculada pela rotina do TRNSYS.15 e apresenta um perfil de comportamento dentro das expectativas para estufas com cobertura à base de polietileno, ou seja, um acréscimo da temperatura do ar na zona no período diurno, devido a presença da radiação solar, e uma queda acentuada desta temperatura no período noturno.

No gráfico da figura 4.4, abaixo, pode-se observar uma simulação para o mesmo período, onde, além das temperaturas do ar na zona (tzona) e do ar no ambiente externo (tamb), são representadas também as seguintes temperaturas: temperatura interna da superfície horizontal da cobertura (tplastico), temperatura do solo na superfície interna (tsolo) e a temperatura da abóbada celeste (tceu).

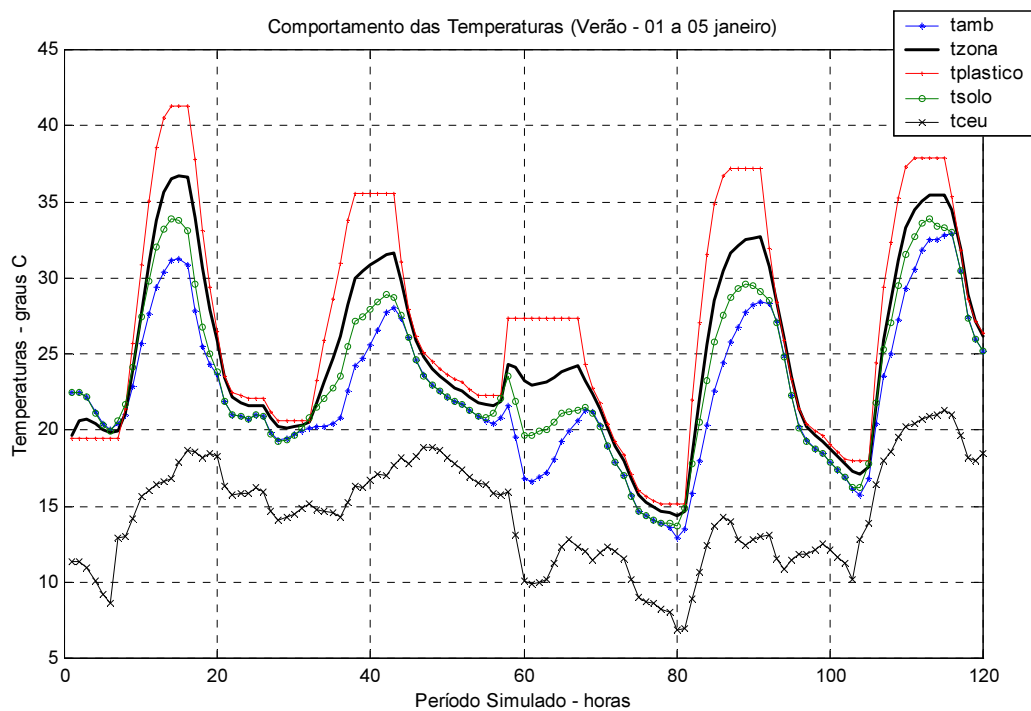


Fig. 4.4 – Simulação da temperatura do ar na zona (tzona) e da temperatura do ar no ambiente externo (tamb) para dados relativo ao período de 01 a 05 de janeiro, demonstrando as temperaturas da abóbada celeste (tceu), da superfície interna da cobertura horizontal (tplastico) e da superfície do solo interno da estufa (tsolo).

O gráfico permite observar o comportamento térmico das superfícies internas, a partir dos resultados obtidos para o solo (superfície 6) e para a cobertura horizontal (superfície 5). Ambas apresentam valores superiores às temperaturas do ar obtidas para a zona, no período diurno da simulação. Nos períodos noturnos da simulação, onde apresentam-se valores menores para todas

as temperaturas, a temperatura do ar na zona aproxima-se da temperatura interna da superfície de cobertura. Nesses mesmos horários, observa-se que a temperatura superficial do solo interno aproxima-se da temperatura do ar no ambiente externo. Este comportamento é coerente com os fenômenos térmicos esperados neste tipo de edificação. Ainda na figura 4.4, podem ser observados os valores de temperatura da abóbada celeste utilizados na rotina computacional (dimensionadas pelo TRNSYS.15).

Ainda com a intenção de observar-se o comportamento da rotina computacional, promoveu-se nova simulação utilizando-se dados de temperatura e de radiação solar incidente, obtidos no arquivo TRY de Porto Alegre, relativo às condições meteorológicas de inverno, entre as datas de 01 a 05 de junho, cujos resultados podem ser observados na figura 4.5 abaixo.

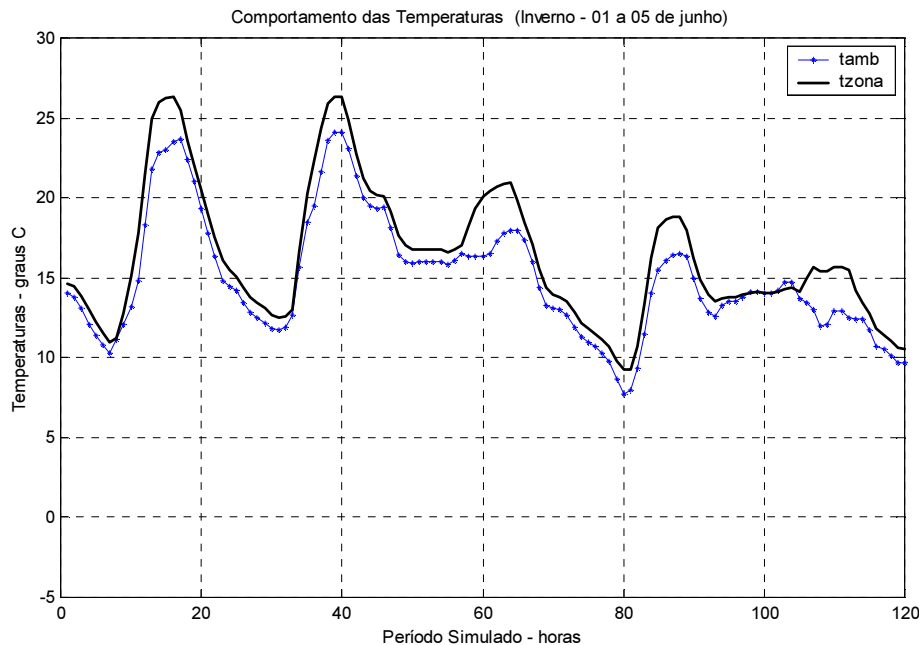


Fig. 4.5 – Simulação da temperatura do ar na zona (tzona) e da temperatura do ar no ambiente externo (tamb) para dados relativos ao período de 01 a 05 de junho.

As condições climáticas típicas desse período com influência no modelo são: menor incidência de radiação solar e temperaturas do ar mais baixas, principalmente à noite. Observa-se, que os resultados obtidos também proporcionam ganhos diurnos de temperatura do ar na zona mais elevados que do ar no ambiente externo à estufa, embora em diferenciais menores que os obtidos no período de verão. Da mesma forma que a simulação anterior, nos períodos noturnos, obtém-se valores muito próximos para ambas temperaturas. Tais valores mantêm a coerência com o comportamento térmico esperado para esta modalidade de edificação.

A seguir, conforme a figura 4.6, a similaridade do que foi apresentado na simulação para o período de verão, além dos valores expressos na figura anterior, são representados graficamente os valores obtidos de temperaturas das superfícies internas para a cobertura horizontal e para o solo, da temperatura celeste.

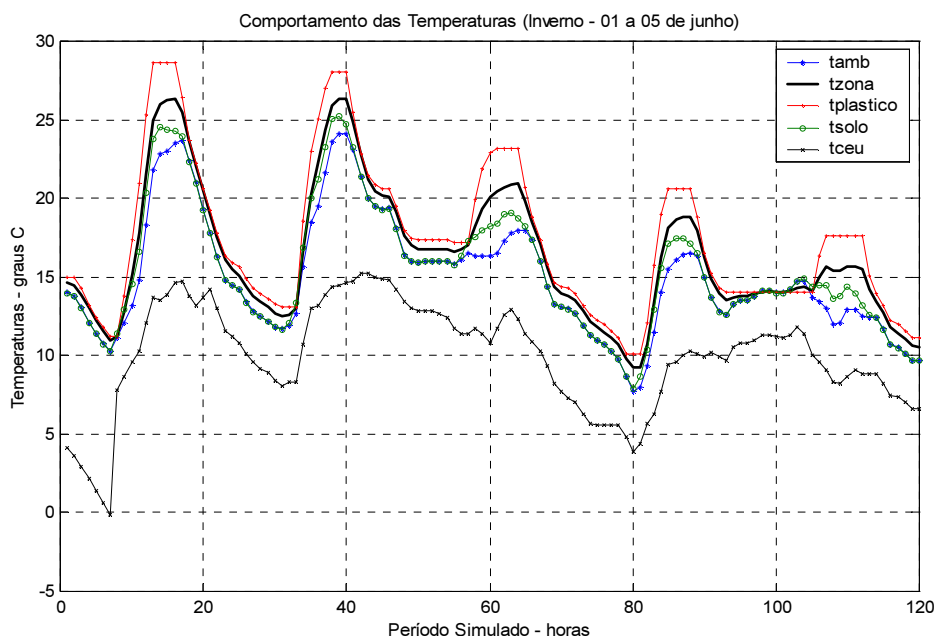


Fig. 4.6 - Simulação da temperatura do ar na zona (tzona) e da temperatura do ar no ambiente externo (tamb) para dados relativo ao período de 01 a 05 de junho, demonstrando as temperaturas da abóbada celeste (tceu), da superfície interna da cobertura horizontal (tplastico) e da superfície do solo interno da estufa (tsolo).

Ainda nesta figura, no período próximo a hora 100, equivalente 3 horas da madrugada, a simulação representa fisicamente o fenômeno chamado de "inversão térmica noturna". Esse fenômeno ocorre, quando a temperatura do ar no interior da estufa atinge valores iguais, e até inferiores, ao da temperatura do ar no exterior da estufa, devido ao aumento de intensidade na troca de radiação em ondas longas com o céu.

Deve ser considerado também que, nestes modelos, aplicou-se as propriedades observadas por Schneider et al. (1998) para ondas longas do plástico da cobertura. Nesse trabalho foi verificado que a transmissividade para o espectro de radiação em ondas longas é muito semelhante a do espectro em ondas curtas. Assim sendo, o plástico não oferece as melhores e ideais condições para a ocorrência eficaz do efeito estufa.

As propriedades físicas ideais de materiais para estufas contém propriedades similares ao vidro, com alta transmissividade em ondas curtas e baixa transmissividade em ondas longas,

aumentando o "efeito estufa" e minimizando as perdas noturnas. A figura 4.7 possibilita a comparação das curvas da temperatura do ar na zona obtidas pela rotina computacional, com a transmissividade do plástico para ondas longas igual a 0,20 (simulando vidro) e 0,80 (comportamento real). Esta simulação tem como referência os dados e valores obtidos para o período de 01 a 05 de junho.

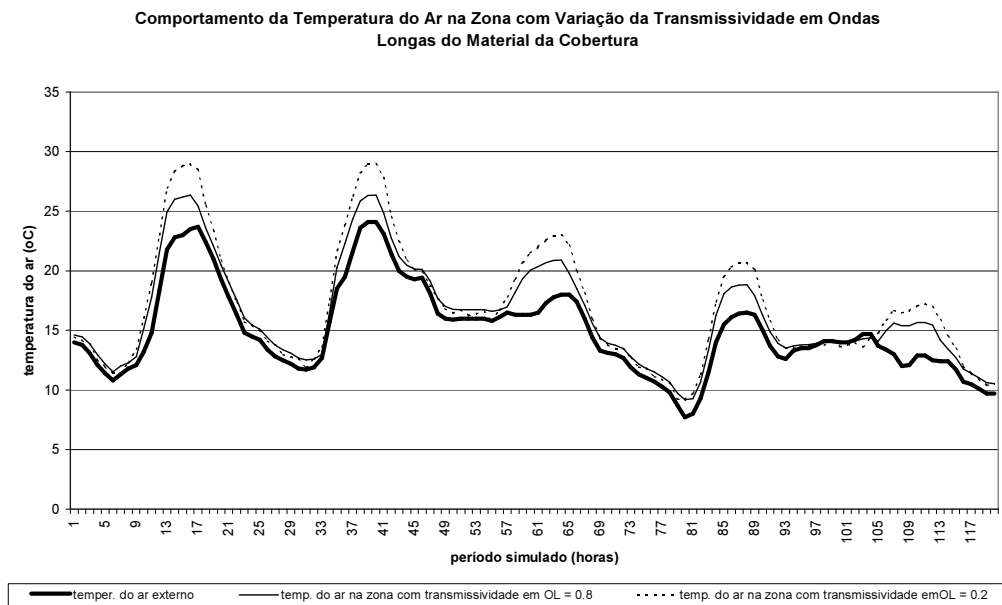


Fig. 4.7 – Variação da temperatura do ar na zona, relativa a simulação do período de 01 a 05 de junho, aplicando-se 0,2 e 0,8 para a transmissividade em ondas longas do plástico.

Ao aplicar-se na rotina computacional, como parâmetro de entrada, a transmissividade em ondas longas e curtas para o plástico com valores similar ao vidro (0,20), é possível observar-se no gráfico, um aumento da temperatura do ar na zona nos períodos diurnos, e um pequeno decréscimo no períodos noturnos, quando comparados às propriedades originais. Este comportamento caracteriza uma acentuação do fenômeno relativo ao efeito estufa.

#### 4.5. TESTES DE SENSIBILIDADE

Ainda tendo como referência a simulação e os resultados obtidos para o período de 01 a 05 de junho, aplicou-se uma série de simulações, com a finalidade de testar a resposta do modelo, quando submetido a variações simétricas de 10 %, a mais e a menos, relativamente aos valores atribuídos a alguns parâmetros definidos inicialmente. Estes valores iniciais para os parâme-

tros, foram empregados para a obtenção das curvas de comportamento da temperatura do ar da zona, que servirão como referência para as simulações do teste de sensibilidade.

A figura 4.8, a seguir, mostra o desvio relativo para a temperatura do ar na zona, obtida por  $(t_z - t_{zref})/t_{zref}$ , relativamente a variação de  $\pm 10\%$  para a temperatura celeste e para a transmissividade em ondas longas do plástico.

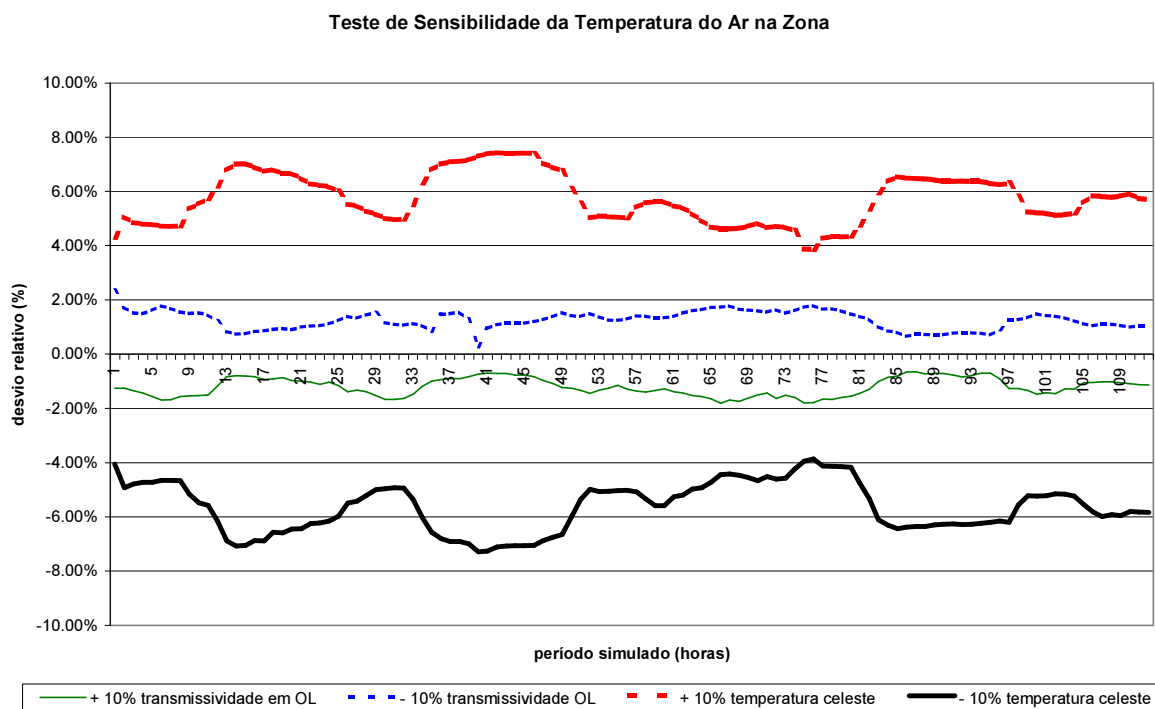


Fig. 4.8 – Resultados do teste de sensibilidade para variações da temperatura celeste e da transmissividade em ondas longas do polietileno.

Observa-se que a variação da transmissividade de 10% aplicada ao modelo apresenta respostas coerentes com o esperado. Ou seja, aumentando-se a transmissividade em ondas longas das superfícies de polietileno, aumentam-se as perdas térmicas radiantes para o meio externo. Portanto, a temperatura do ar na zona adquire valores menores que o valor de referência. Para a simulação oposta, com redução em 10% da transmissividade em ondas longas da superfície plástica em relação ao valor referenciado na simulação original, obtém-se valores maiores para a temperatura do ar na zona. Em ambos os casos, os desvios relativos não superam patamares de 2%.

Quanto ao comportamento obtido quando da variação da temperatura celeste em  $\pm 10\%$ , relativamente aos valores referenciados, os resultados também são coerentes com o esperado. Para temperaturas celestes 10% mais altas, obtém-se desvios relativos positivos em limites de até 7%, o que representa temperaturas do ar na zona mais elevadas. Para temperaturas celestes 10%

menores, os resultados obtidos com o teste de sensibilidade, apresentam desvios relativos negativos nos mesmos níveis percentuais, significando menores temperaturas do ar na zona.

Esta avaliação de sensibilidade permite deduzir que as variações de temperatura da abóbada celeste exercem forte influência nos valores de temperatura do ar na zona obtidos por essa modelagem computacional, quando comparados com os demais parâmetros submetidos ao teste de sensibilidade.

A figura 4.9, mostra o desvio relativo aos resultados da simulação do período de 01 a 05 de junho, quando aplicou-se  $\pm 10\%$  aos valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção, para superfícies internas e externas.

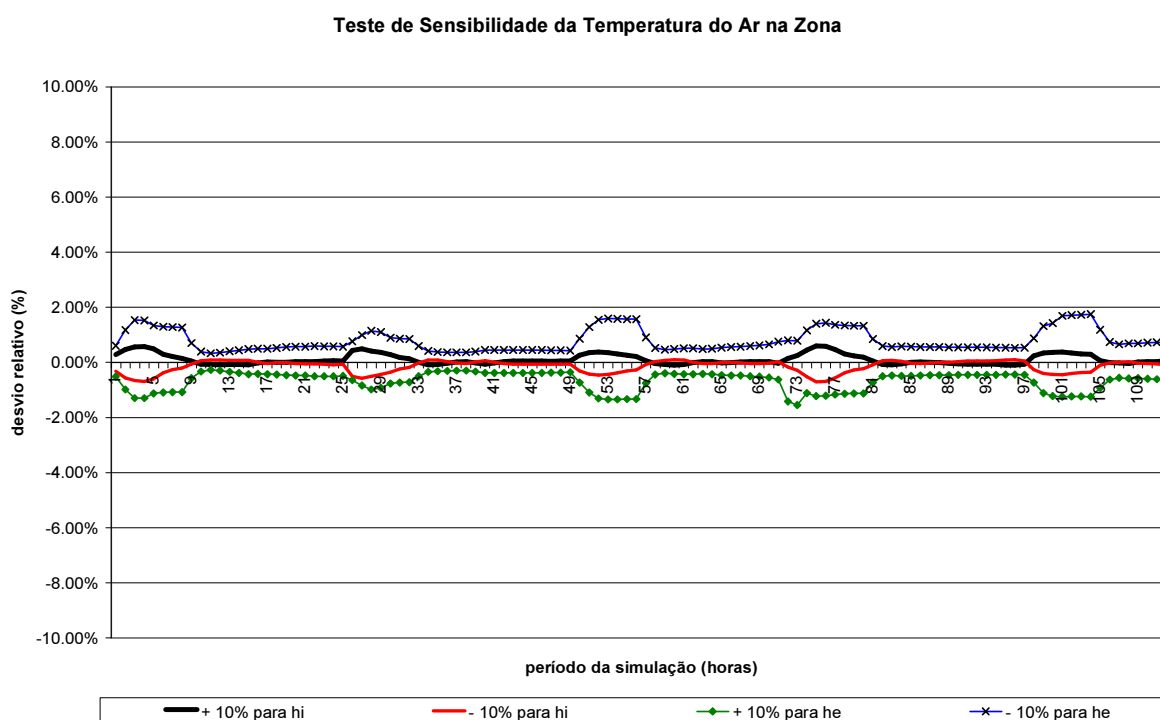


Fig. 4.9 – Resultados do teste de sensibilidade para os coeficientes internos e externos de transferência de calor por convecção.

No gráfico acima, observa-se que o comportamento obtido para variação dos coeficientes convectivos de transferência de calor para as superfícies internas (*hi*) e externas (*he*), embora com resultados coerentes com a variação esperada, praticamente não alteram a temperatura do ar na zona, visto que os percentuais obtidos para os dois casos são muito próximos a zero.

Considerando o regime de trabalho dessas estufas e o reduzido espectro de variação que podem sofrer (*he* e *hi*), esta avaliação de sensibilidade permite deduzir que estes coeficientes tem sua influência minimizada nos resultados da temperatura do ar na zona.



## 4.6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as primeiras 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 a 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 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 aplicado um teste de sensibilidade para vários parâmetros, as respostas obtidas permitem concluir que os dados que exigem maior acuracidade são aqueles relativos à transmissividade em ondas longas do plástico e a temperatura celeste.

Observou-se, também, uma boa resposta do modelo para a simulação realizada com propriedades radiantes da cobertura semi-transparente similares às do vidro, melhorando os ganhos de temperatura e minimizando os efeitos da inversão noturna.

As simulações efetuadas permitiram observar as variações de temperatura do ar da zona, que serviram para definir as faixas de temperatura empregadas no cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção. Após a avaliação de algumas formulações, adotou-se valores de 2, 1 e 5  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , para as superfícies internas, solo e superfícies externas, respectivamente.

Portanto, a coerência dos resultados, permite concluir que a rotina computacional desenvolvida, poderá ser empregada para simulação com dados reais, que será objeto do próximo capítulo.

## 5. SIMULAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. INTRODUÇÃO

Os dados experimentais serão agora empregados como entrada da rotina computacional, o que levará a comparação com os resultados simulados. Esse procedimento possibilitará responder as seguintes questões:

- A temperatura simulada do ar do ambiente da estufa se aproxima da mesma temperatura medida nos experimentos?
- Em que circunstâncias os resultados simulados coincidem e divergem com os valores medidos? Que hipóteses justificam estas situações?
- Com relação as hipóteses adotadas para a modelagem física, há necessidade de reconsiderações para justificar os resultados obtidos?
- Que outros aspectos relacionados com as hipóteses adotadas necessitam de mais prospecções e medições de campo para explicar os resultados ou melhorar o modelo desenvolvido?

Desta forma, é imprescindível descrever-se as etapas seguidas nesta simulação, bem como promover-se um breve relato do experimentos realizados e resultados obtidos pelo Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE) da Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### 5.2 – CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DA ESTUFA

Os dados experimentais que serão empregados nesse trabalho foram obtidos ao longo do ano de 2000, em uma estufa de aproximadamente 1500 m<sup>2</sup>, montado em um sítio na cidade de Ipê, Rio Grande do Sul. Os relatórios do projeto GESTE [Schneider et al. (2000)] descrevem a estufa escolhida aqui como sendo a "estufa nova", que foi projetada no final de 1998 com auxílio da equipe envolvida naquele projeto de pesquisa e construída ao longo de 1999. Ela é provida de acessórios e soluções que buscavam melhorar seu desempenho térmico passivo, isto é, sem o auxílio de fontes de climatização extras. Sua cobertura é em arco e suas laterais tem janelas ao longo de toda a extensão, que são abertas de baixo para cima por enrolamento do plástico. O plástico corre numa canaleta e acomoda-se em baixo num tipo de berço, buscando diminuir a infiltração de ar no ambiente interno. O croquis dimensional da estufa, bem como a orientação geográfica de suas superfícies estão representados na figura 5.1.

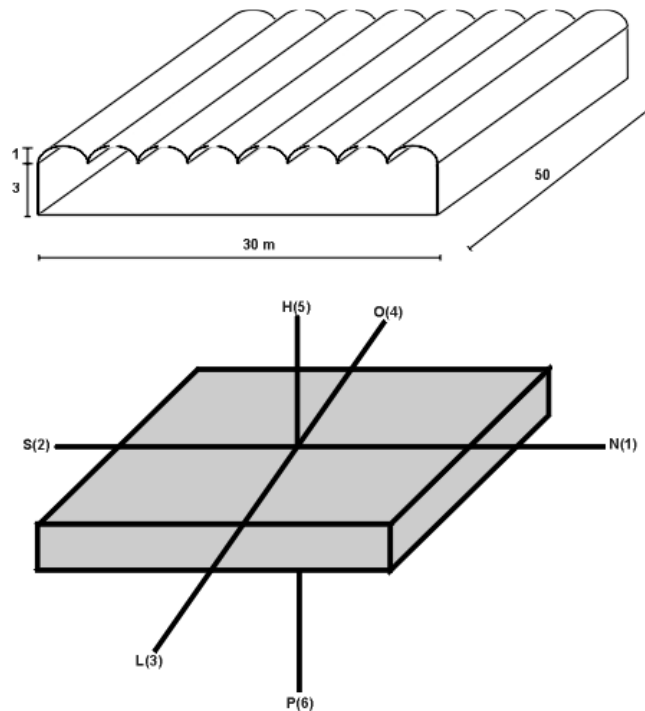


Fig. 5.1 – Dimensões e orientação geográfica das superfícies da estufa

### 5.3. INSTRUMENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS PARA AS MEDIÇÕES

A medição da radiação solar sobre plano horizontal foi realizada com o auxílio de piranômetros desenvolvidos pela equipe do GESTE [Zanesco (1991)], cujo esquema é representado na figura 5.2 abaixo.

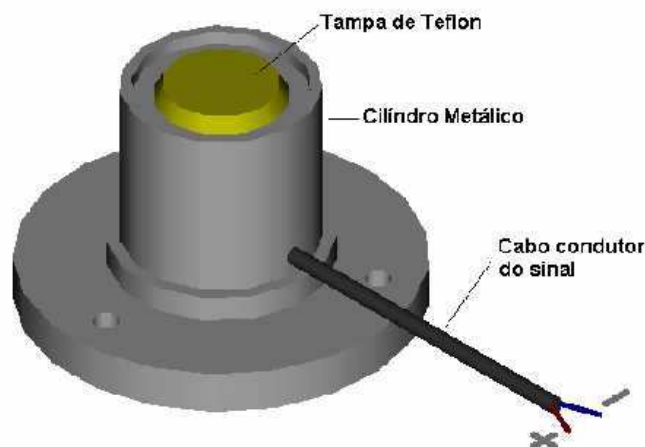


Fig. 5.2 - Piranômetro para medição de radiação solar utilizado nas medições

O princípio de funcionamento desses sensores baseia-se na geração de um sinal (uma diferença de potencial) a partir da luz solar através de uma célula fotovoltaica localizada den-

tro do cilindro metálico. Uma tampa de teflon cobre a abertura superior desse cilindro de maneira a homogeneizar a luz que incide sobre a célula. Um cabo blindado é conectado à célula para capturar o sinal produzido.

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. Para que o piranômetro conseguisse ler somente a radiação difusa, foi usada uma estrutura com uma “banda de sombreamento”, ou seja, uma faixa metálica posicionada de tal modo que tal modo que oculta a radiação solar direta. Na figura 5.3 pode ser observado o piranômetro com banda de sombreamento.

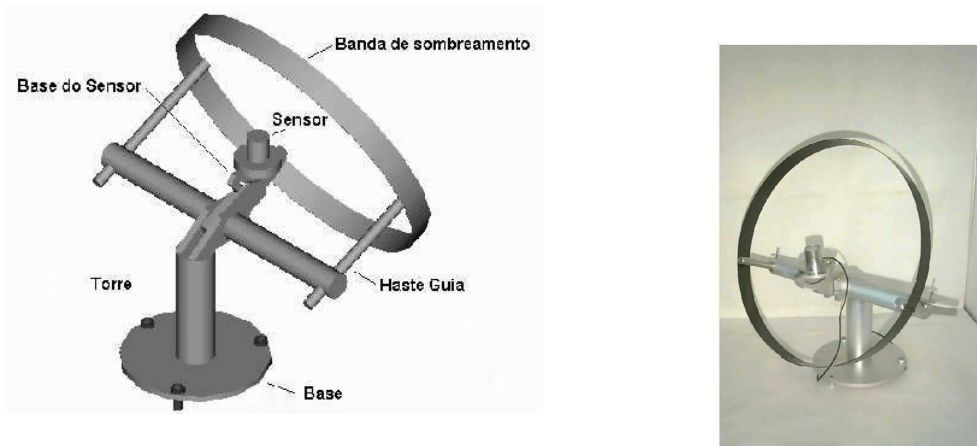


Fig. 5.3 – Desenho descritivo e foto do piranômetro com a banda de sombreamento

Tais equipamentos foram testados durante aproximadamente três meses, em laboratório, para verificação de seu posicionamento, orientação e funcionamento. Periodicamente (a cada 5 dias), foram feitos ajustes na banda de sombreamento, devido ao deslocamento solar. O cabo do sensor foi conectado à placa de aquisição de dados de um computador, onde era feita a leitura do sinal produzido. Um aplicativo especialmente desenvolvido processava os dados lidos pela placa, transformando-os de mV para  $W.m^{-2}$ . Tal constante foi determinada na sua calibração. Foram apropriadas e memorizadas medições com intervalos de aproximadamente 5 minutos.

Ainda conforme relatórios do GESTE, o acompanhamento experimental da comportamento da temperatura, dentro e fora das estufas, motivou o desenvolvimento de sistemas de

aquisição automática de dados, para o qual foi escolhida a linguagem de programação HP VEE 4.01.

Para as leituras do ambiente externo foi montada uma Estação Meteorológica capaz de fornecer dados de temperatura e umidade do ar além dos Piranômetros para medições de radiação solar total e difusa sobre o plano horizontal, como mostra a figura 5.4.



Fig. 5.4 – A Estação Meteorológica

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 a 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.

Após estudar várias alternativas, a equipe do GESTE optou pelo uso de sensores AD592, um semi-condutor que atua como fonte de corrente, e que permite a transmissão de dados à distância, livre de interferências magnéticas.

Para aquisição e processamento dos dados de todos os sensores, inclusive os de radiação, foram utilizadas 4 unidades de aquisição, baseadas em arquitetura de computadores PC e equipados com controladores 80196.

#### **5.4. SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS**

Os dados experimentais escolhidos fazem parte de duas seqüências longas, de 5 dias cada. Foram escolhidos os períodos compreendidos entre 9 a 13 de julho (120 horas) e entre 24 a 28 de julho (120 horas), ambos de 2000.

A exemplo dos procedimentos adotados para preparação dos dados de entrada das simulações do capítulo anterior, os dados experimentais, oriundos das medições de campo, utilizados nas simulações seguintes referem-se àqueles coincidentes, ou mais próximos possíveis, com as medições efetuadas nas "horas cheias".

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, com base nos processadores de radiação (figura 4.2).

Para efeito dos cálculos do processador de radiação, considerou-se a latitude do município de Ipê equivalente a  $-30^{\circ}$ .

Para o período compreendido entre os dias 9 e 13 de julho, após o processamento citado, obteve-se os valores das componentes diretas e difusa da radiação solar nas superfícies orientadas, conforme mostra a figura 5.5.

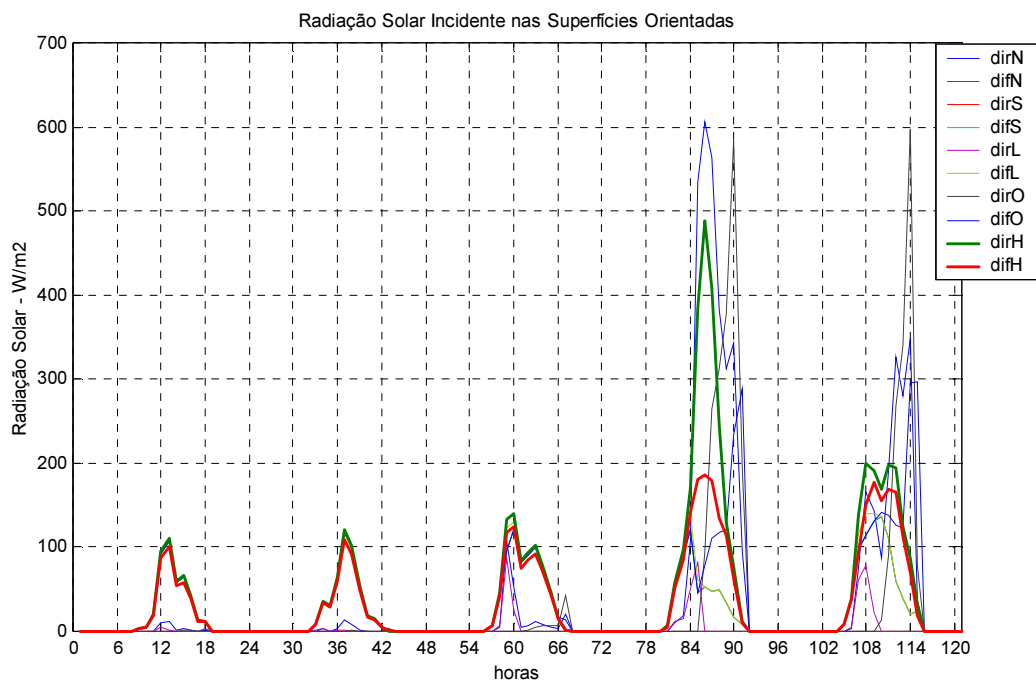


Fig. 5.5 - Representação gráfica das componentes direta e difusa da radiação solar incidente nas superfícies orientadas da estufa para o período de 9 a 13 de julho.

Na legenda, as siglas iniciadas por **dr** referem-se às componentes diretas, e as iniciadas por **df** às componentes difusas. As letras **N,S,L** e **O**, que complementam as siglas da legenda, referem-se, respectivamente, às superfícies verticais com orientação Norte, Sul, Leste e Oeste. Da mesma forma, a letra **H** refere-se à superfície horizontal.

Interpretando-se os valores do gráfico, verifica-se dias de baixíssima incidência de radiação solar, tanto da forma direta quanto da forma difusa, as quais apresentam-se com níveis de intensidade similares, exceto o quarto dia da seqüência, onde as componentes diretas aumentam de intensidade. Como não se teve acesso a registros ou informações sobre o comportamento meteorológico do período, uma análise focada nestes valores permitiria apenas deduções aproximadas. Uma delas seria caracterizar como um período com intensa cobertura de nuvens (dias fechados) e, provavelmente, com alto teor de umidade relativa. Inclusive com grande possibilidade de ter ocorrido chuva. O comportamento do quarto dia pode significar uma pequena alteração nas condições citadas (melhoria de tempo).

A figura 5.6 apresenta os valores obtidos pela medição da temperatura do ar no ambiente externo e os valores calculados pela rotina TRNSYS.15 para a temperatura da abóbada celeste, ambas relativas ao período de 9 a 13 de julho.

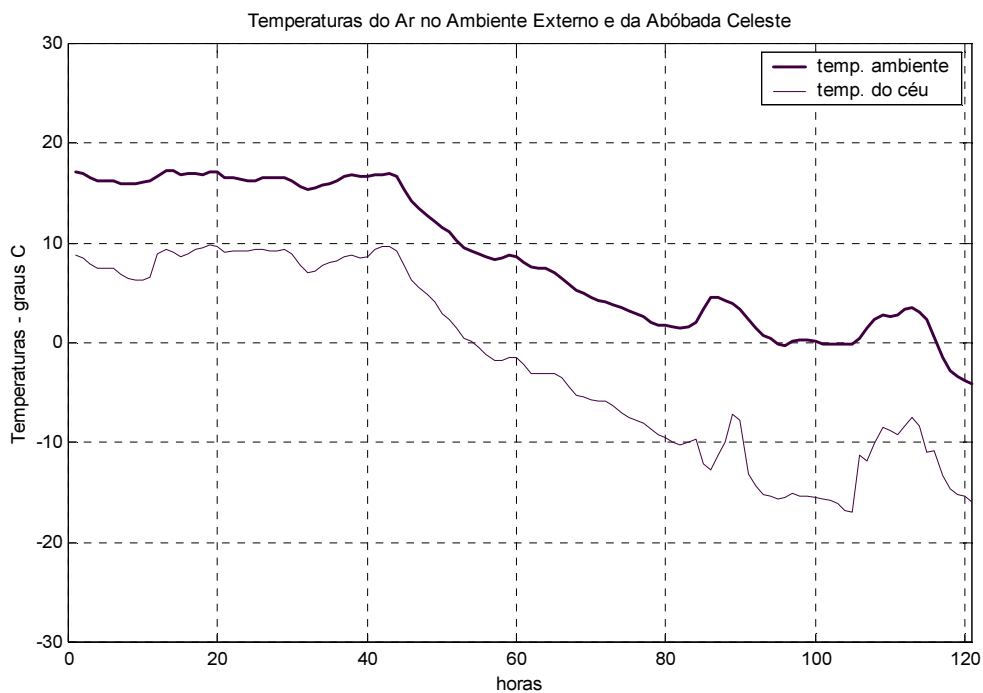


Fig. 5.6 – Gráfico representativo dos valores medidos para a temperatura do ar no ambiente externo (temp. ambiente) e dos valores calculados para a temperatura da abóbada celeste (temp. do céu), no período de 9 a 13 de julho.

A interpretação dos resultados permite afirmar que os primeiros 2 dias e noites da seqüência apresentam temperaturas diurnas e noturnas estáveis, entre 15 e 17 °C, altas para a região (serrana) em período de inverno. Entre o terceiro e quarto dias ocorre uma queda ex-

pressiva da temperatura, para a faixa do 2 °C, e até o fim da seqüência, as temperaturas oscilam entre 5 e 0 °C, durante o dia e à noite, respectivamente. Este comportamento tende a confirmar a análise feita anteriormente, ou seja, os 2 primeiros dias com intensa nebulosidade e/ou chuva, uma melhoria de tempo com queda de temperatura à partir do terceiro dia, permitindo maior incidência de radiação solar. A temperatura da abóbada celeste calculada para o período apresenta defasagens menores (da ordem de -8 °C) para os dias considerados nublados e maiores (da ordem de -15 °C) para os dias de céu mais "limpo".

Para a seqüência relativa aos dias 24 a 28 de julho, sujeita ao mesmo processamento aplicado à seqüência anterior, podem ser observados os seguintes resultados apresentados na figura 5.7.

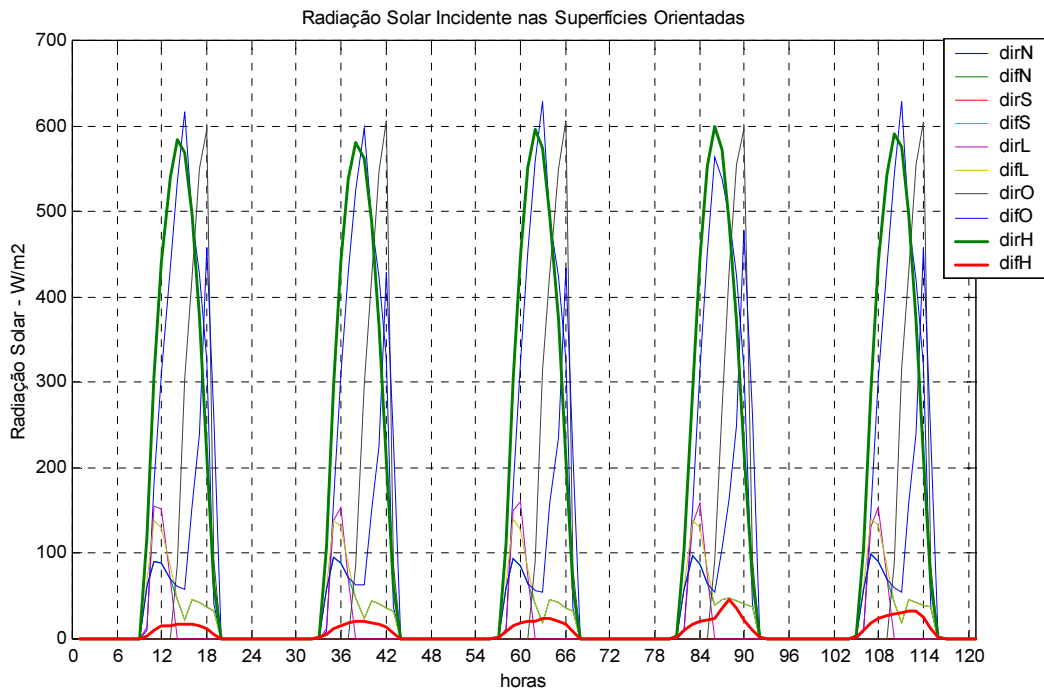


Fig. 5.7 - Representação gráfica das componentes direta e difusa da radiação solar incidente nas superfícies orientadas da estufa para o período de 24 a 28 de julho.

As siglas constantes da legenda do gráfico seguem o mesmo padrão adotado para a figura 5.5.

Devido a ausência de maiores registros e informações meteorológicas, com os mesmos critérios de análise empregados anteriormente, nessa seqüência, os valores graficados representam dias de boa incidência de radiação solar. Com componentes diretas mais expressivas que as componentes difusas, caracterizando dias de céu "limpo", ou com poucas nuvens.



A figura 5.8 apresenta os valores medidos relativos a temperatura do ar no ambiente externo à estufa e os valores calculados para a temperatura da abóbada celeste.

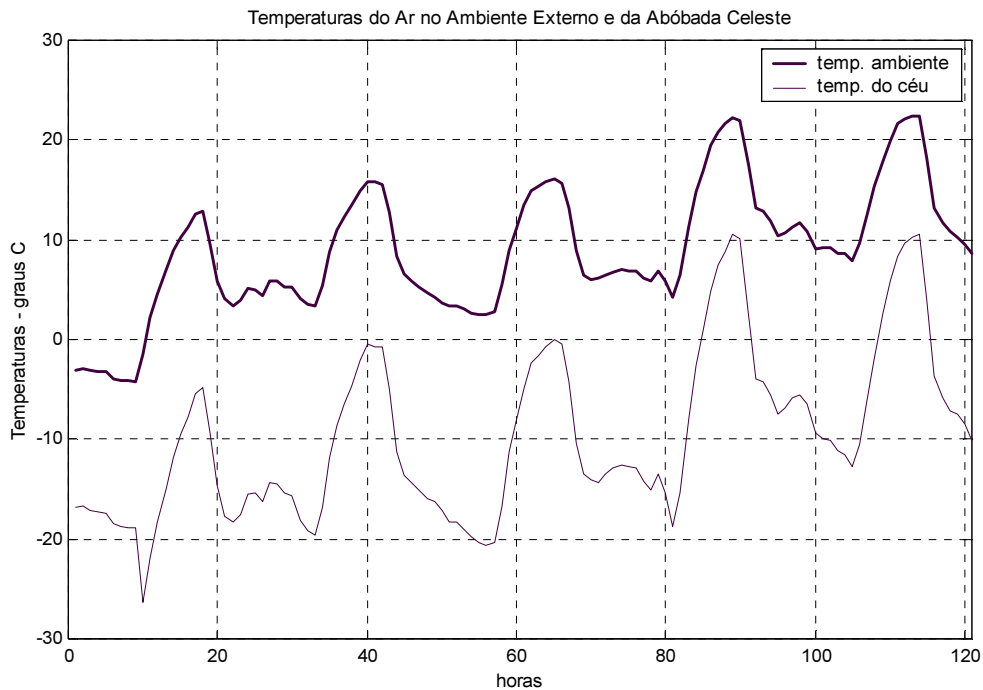


Fig. 5.8 – Gráfico representativo dos valores medidos para a temperatura do ar no ambiente externo (temp. ambiente) e dos valores calculados para a temperatura da abóbada celeste (temp. do céu), no período de 24 a 28 de julho.

Com relação a temperatura do ar, observam-se baixas temperaturas noturnas, entre 3 e 9 °C, e picos de temperaturas diurnas mais elevadas, entre 13 e 25 °C. Esta condição meteorológica, que pode ser considerada como típica do inverno da região do experimento, tende a confirmar a hipótese sobre a ocorrência de "céu limpo" para os dias e noites abrangidos pela seqüência. A temperatura da abóbada celeste calculada apresenta defasagens uniformes da ordem de -20 °C, valores esperados para situações similares.

## 5.5. SIMULAÇÃO COM DADOS REAIS, RESULTADOS E ANÁLISE

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 5.9 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.

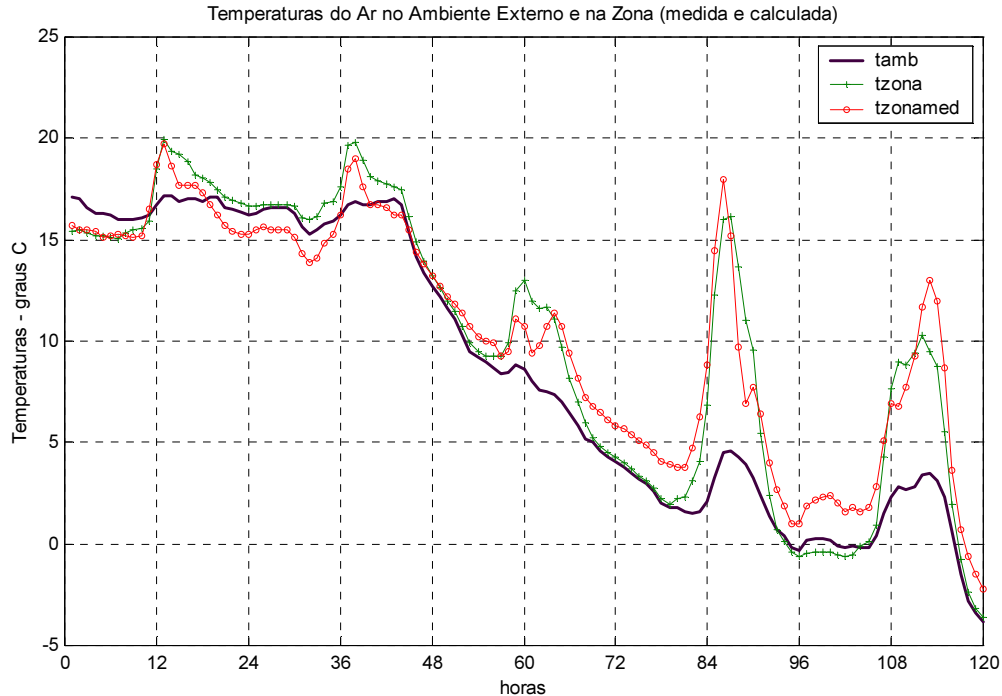


Fig. 5.9 – Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed) e simulada pela rotina computacional (tzona), relativas ao período de 9 a 13 de julho.

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 °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 tendência das curvas para os valores medidos e simulados são similares.

Observa-se ainda que, nesta simulação, considerada a amplitude gráfica das temperaturas de 25 °C (de -5 a 20 °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 5.10 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.

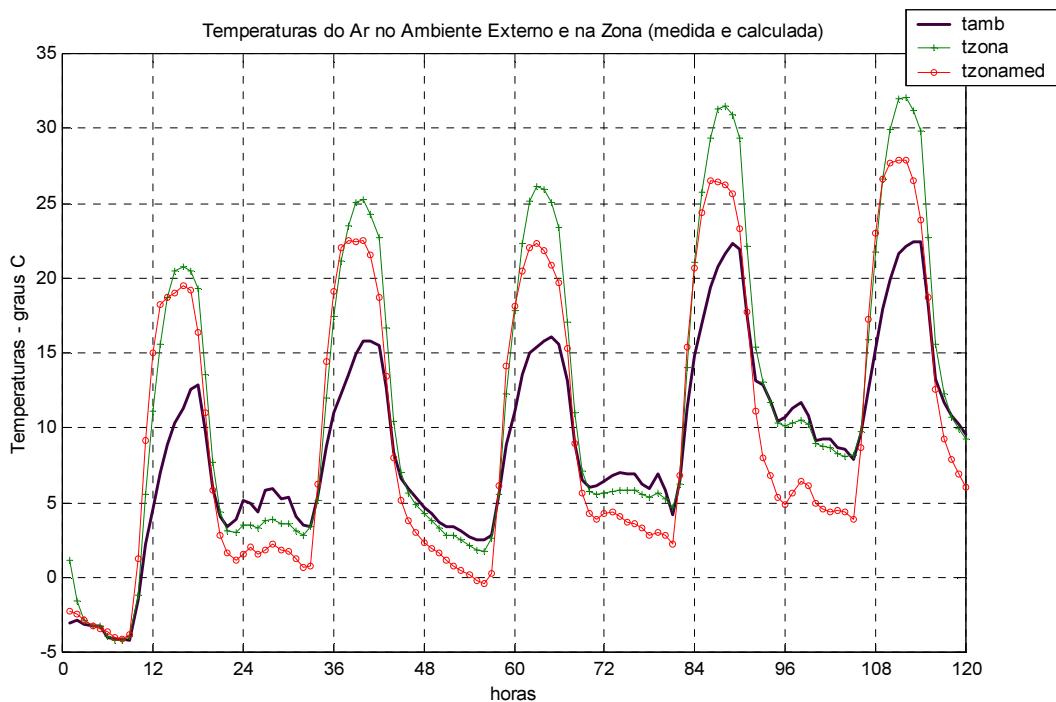


Fig. 5.10 – Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed) e simulada pela rotina computacional (tzona), relativas ao período de 24 a 28 de julho.

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 tendência das curvas para os valores medidos e simulados são similares.

Nesta simulação, considerada a amplitude gráfica 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.

A inclusão no modelo de 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 e da interferência da umidade e condensação de água nas superfícies internas e externas da cobertura da estufa, poderiam aproximar mais os resultados simulados dos medidos.

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 dos comentários efetuados para os dados meteorológicos representados nas figuras 5.7 e 5.8, 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

de aplicado ao modelo, conforme relatado no Capítulo 4, 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 essa influência quando comparada com valores medidos, a figura 5.11 apresenta o resultado de uma simulação para o mesmo período utilizando-se temperatura celeste fixa em  $-35$  °C.

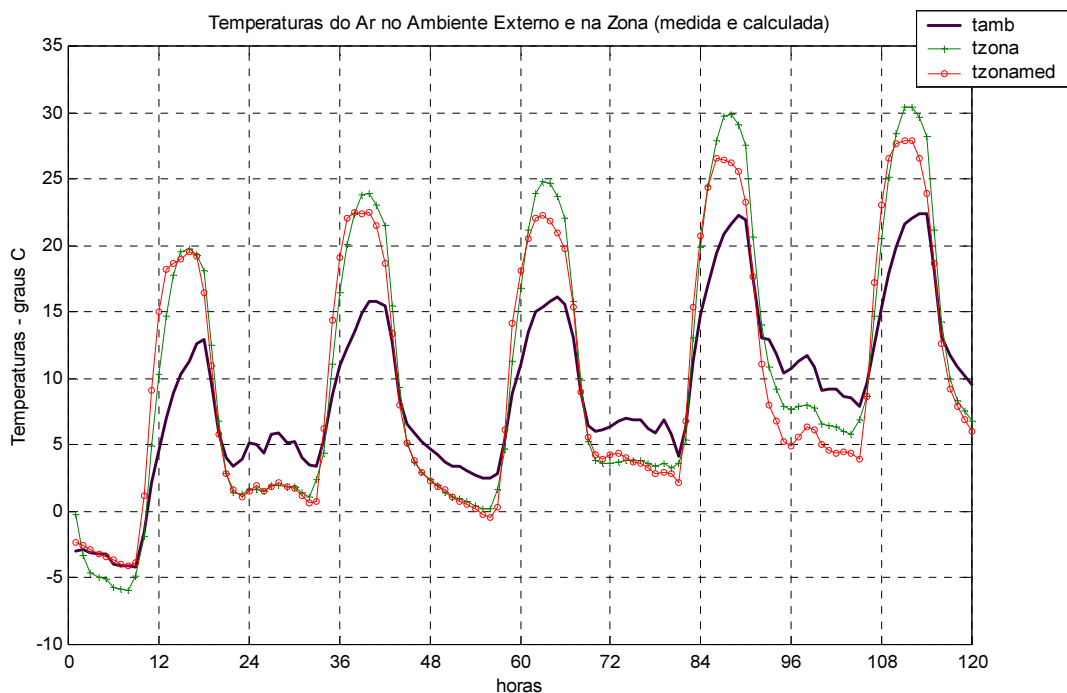


Fig. 5.11 – Gráfico representativo das temperaturas do ar medidas no ambiente externo (tamb) e na zona interna (tzonamed) e simulada pela rotina computacional (tzona), relativas ao período de 24 a 28 de julho, utilizando temperatura da abóbada celeste igual a  $-35$  °C.

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. Diante de tal fato, torna-se imprescindível o acompanhamento mais preciso deste parâmetro.

## 5.5. CONCLUSÕES

De um modo geral, mesmo sem uma análise de erros, as curvas mostram que a modelagem física e computacional representam com boa aproximação os valores medidos, tanto em comportamento como em valores. Essas diferenças são aceitáveis, mesmo considerando as diversas hipóteses restritivas.

Considerando válidas as hipóteses adotadas para a modelagem física, o modelo apresentou respostas coerentes, em valores e comportamentos muito próximos aos valores medidos experimentalmente. Uma simulação com provável ajuste do modelo baseou-se somente na variação da temperatura celeste, obtendo resultados mais convergentes. Portanto, a modelagem, embora necessite de diversas melhorias e aprofundamentos, representa e valida o comportamento térmico da estufa e os valores medidos. Uma análise geral, permite concluir que o modelo apresenta boa resposta nas demais situações observadas.

Algumas incertezas poderiam ser dissipadas com informações adicionais das condições meteorológicas locais, durante os períodos da medição, assim como relatos complementares para os mesmos períodos, sobre as condições de manejo da estufa. Mais certezas também poderiam ser obtidas, com a inclusão na modelagem física de termos que representassem a influência: da presença de condensação no plástico, principalmente à noite; da variação de umidade relativa do ar; da influência do vento que, na região (serrana) e, principalmente, à noite, pode contribuir significativamente; e da condução térmica para o solo em regime transiente.

Os resultados desta modelagem tornam evidentes a necessidade de explorações futuras, sob diversos aspectos, com a finalidade de aprimorar, confirmar e tornar mais confiável simulações para edificações tipo estufas de plasticultura que pretendam ser construídas ou modificadas, com vista a atender necessidades específicas e pré-definidas. Sugere-se que estes avanços para modelagem física e computacional possam ser estendidos para os seguintes aspectos:

- ***Quanto a modelagem física***
  - Deve-se incluir termos relativos a influência da umidade relativa do ar, da condensação, da condução do solo em regime transiente, além da influência da cultura vegetal nas suas diversas etapas de crescimento.

- ***Quanto as medições de campo:***

- Devem ser utilizadas técnicas de avaliação e tratamento de erros;
- O comportamento da temperatura celeste deve ser investigado e medido, se possível, quanto aos valores, variabilidade e relação com as condições meteorológicas;
- Necessita-se de mais informações quanto as propriedades do plástico para ondas longas e curtas, bem como da evolução destes valores com o tempo (degradação) relacionando-os com o período das medições;
- As medidas experimentais, internas e externas, devem ser ampliadas em quantidade, seqüência e estações meteorológicas variadas, definindo, também, o nível de confiabilidade das medições.

- ***Quanto a rotina computacional***

- Deve ser provida de "interfaces amigáveis com o usuário", para permitir o uso da rotina por não programadores e/ou usuários não familiarizados com a rotina, principalmente no que se refere a modificação dos parâmetros de entrada;
- Deve-se incluir subrotinas de cálculo de radiação solar incidente em superfícies verticais, a partir de definições de ângulos zenith, azimutais, data solar, localização e orientação geográfica, com a finalidade de dispensar a utilização de outros aplicativos, assim como rotina para determinação do fator de forma das superfícies internas, permitindo a modelagem de estufas com outras dimensões sem necessidade de alterações na rotina computacional;
- Deve-se incluir subrotinas para determinação da variação dos coeficientes de transferência do calor por convecção para as superfícies internas e externas, inclusive com a influência da velocidade do vento, para dar mais confiabilidade aos resultados.

## 6. CONCLUSÕES

A pesquisa bibliográfica revela que a literatura técnica apresenta uma quantidade bastante significativa de estudos sobre o comportamento térmicos 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, desenvolve-se uma modelagem das equações de balanço de energia. Com ela, é 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 plástico (polietileno de baixa densidade), 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 necessidade de diversas melhorias para a modelagem e para os experimentos de campo, todas sugeridas detalhadamente.

Portanto, entende-se que o presente trabalho cumpre com os objetivos propostos inicialmente, pois a modelagem desenvolvida, e sua respectiva rotina computacional, apresenta 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 a 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

Boesing, J., 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, Brasil.

Delwiche, S. R. e Willits, D. H., 1984. **The Effect of Condensation on Heat Transfer Through Polyethylene Film**. American Society of Agricultural Engineers - ASAE, EUA, 6 p.

Dias, J. B., 2001. **Construção e Avaliação de uma Bancada Para Calibração de Sensores Para Cálculo de Umidade Relativa do Ar**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC)-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Duffie, J. e Beckman, W., 1990. **Solar Engeneering of Thermal Process**. 2a. ed. New York, EUA. Ed. John Wiley and Sons.

Frisina, V. A. e Escobedo, J. F., 1998. **Balancos de Radiação Solar e de Energia em Estufa com Cobertura de Polietileno**. Departamento de Ciências Ambientais, UNESP, Botucatu, São Paulo, Brasil, 7 p.

Frisina, V. A. e Escobedo, J. F., 1999. **Balancos de Radiação e Energia da Cultura de Alface em Estufa de Polietileno**. Departamento de Ciências Ambientais, UNESP, Botucatu, São Paulo, Brasil. 11 p.

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, Brasil, 64 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 Ingenieria 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 Ingenieria Rural, ETSIA, Madri, Espanha, 11p.

Hanselman, D. e Littlefield, B., 1999. **MATLAB 5 – Guia do Usuário**. São Paulo, Brasil: Makron Books, 413 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.

Kimball, B. A., 1972 **Simulation of the Energy Balance of a Greenhouse**. Phoenix, EUA: U. S. Water Conservation Laboratory, 19 p.

Martins, S. R. e Gonzales, J. F., 1995. **Avaliação da Temperatura Interna de Estufa Plástica Dotada com Sistema de Calefação por Fluxo de Ar Quente**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, vol. 3, pag. 5-12, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 8p.

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.

Pieters, J. G., Deltour, J. M. e Debruyckere, M. J., 1996. **Condensation and Static Heat Transfer Through Greenhouse Covers During Night**. Madri, Espanha: Ag Eng 96, 13 p.

Santamouris, M., Argiriou, A. e Vallindras, M., 1994. **Design and Operation of Low Energy Consumption Passive Solar Agricultural Greenhouse**. Solar Energy, num. 5, vol. 52, EUA, 8p.

Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C. A., Lewis, J. O., Vallindras, M. e Argiriou, A., 1995. **Energy Conservation in Greenhouses With Buried Pipes**. Energy, n. 5, Inglaterra, 8p.

Schneider, P. S., 1994. **Comportement Thermo-aéraulique des Bâtiments: Stratégies de Resolution du Problème Couplé**. Tése de doutorado: Institut National des Sciences Appliques de Lyon, França, 246 p.

Schneider, P. S., 2000a. **Comportamento Térmico de Ambientes**. Notas de aula: P 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)-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Seginer, I., 1983. **On The Night Transpiration of Greenhouse Roses Under Glass or Plastic Cover**. Haifa, Israel: Department of Agricultural Engineering Technion, 12 p.

Sentelhas, P. S. e Santos, A. O., 1995. **Cultivo Protegido: Aspectos Microclimáticos**. Palestra do 10<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Floricultura e Plantas Ornamentais, Campinas, São Paulo, Brasil, 8p.

Strand, R.K., Pedersen, C.O. e Crawley, D.B., 2001. **Modularization and Simulation Techniques for Heat Balance Based Energy and Load Calculation Programs; The Experience of The ASHRAE Loads Toolkit and Energyplus**. Rio de Janeiro, Brasil, Seventh International IBPSA Conference, 8 p.

Sutar, R. F. e Tiwari, G. N., 1994. **Analytical and Numerical Study of Controlled-Environment Agricultural System for Hot and Dry Climatic Conditions**. New Delhi, Índia: Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, 10 p.

**TRNSYS – A Transient System Simulation Program. Reference Manual**. 2000. Madison, EUA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.

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.

Walker, J. N. e Walton, L. R., 1971. **Effect of Condensation on Greenhouse Heat Requirement**. American Society of Agricultural Engineers - ASAE, EUA, 3 p.

Zanescio, I., 1991. **Análise e Construção de Um Piranômetro Fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

## **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

Bejan, A., 1996. **Transferência de Calor**. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 540 p.

Kämpf, A. N., 2000. **Produção Comercial de Plantas Ornamentais**. Guaíba, Brasil: Agropecuária, 254 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.

(a. d.). **Equipo Para el Control del Medio Ambiente**. 40 p.

(a. d.). **Aquecimento de Estufas**. 5 p.

ANEXO 1

ALGORÍTMO DA ROTINA COMPUTACIONAL

GRANDEZAS, VETORES E MATRIZES COM PARÂMETROS PRÉ-DEFINIDOS

tempo=3600  
dt=3600  
roar=1.185  
cpar=1006

- tempo para simulação [s]
- tempo entre interações [s]
- massa específica do ar a 300 K [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- calor específico do ar a 300 K [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

nar=1  
larg=30  
prof=50  
altes=4

- renovações do volume de ar por hora
- largura da estufa [m]
- profundidade da estufa [m]
- altura efetiva da estufa [m]

n=6  
hi=2  
he=5  
hig=1

- número de superfícies
- coeficiente de troca de calor por convecção interno [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- coeficiente de troca de calor por convecção externo [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- coeficiente de troca de calor por convecção interno para o solo [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]

kp=0.35  
kg=1.5  
lp=0.0001  
lg=0.15

- condutividade térmica do plástico [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- condutividade térmica do solo [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- espessura das superfícies plásticas [m]
- espessura considerada da camada de solo [m]

tj=15  
Qfz=0  
Qrz=0

- temperatura de início da simulação [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- calor adicional fornecido para a zona [W]
- calor retirado do zona [W]

{emol}(1a5)=0.1  
{emol}(6)=0.8  
{absoc}(1a5)=0.1  
{absoc}(6)=0.8

- emissividade do plástico para Ondas Longas
- emissividade do solo para Ondas Longas
- absorvidade do plástico para Ondas Curtas
- absorvidade do solo para Ondas Curtas

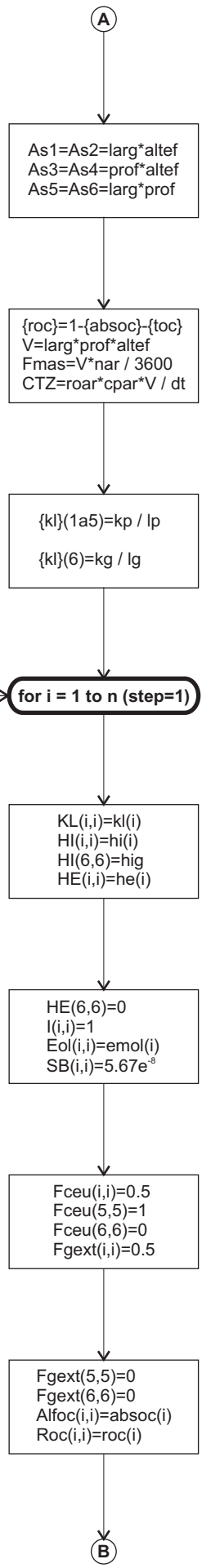
{toc}(1a5)=0.8  
{toc}(6)=0  
{tol}(1a5)=0.8  
{tol}(6)=0

- transmissividade do plástico para Ondas Curtas
- transmissividade do solo para Ondas Curtas
- transmissividade do plástico pra Ondas Longas
- transmissividade do solo para Ondas Longas

F  
(matriz dos Fatores de Forma  
entre as superfícies internas)

A

DIMENSIONAMENTO E PARAMETRIZAÇÃO DAS MATRIZES E VETORES



- cálculo das áreas das superfícies

- cálculo do vetor de refletividades em Ondas Curtas  
 - cálculo do volume da estufa [m<sup>3</sup>]  
 - cálculo do fluxo de massa [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]  
 - cálculo da capacidade térmica do ar [W.K<sup>-1</sup>]

- cálculo do vetor das condutividades térmicas / espessura [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]

- LAÇO COM n CICLOS

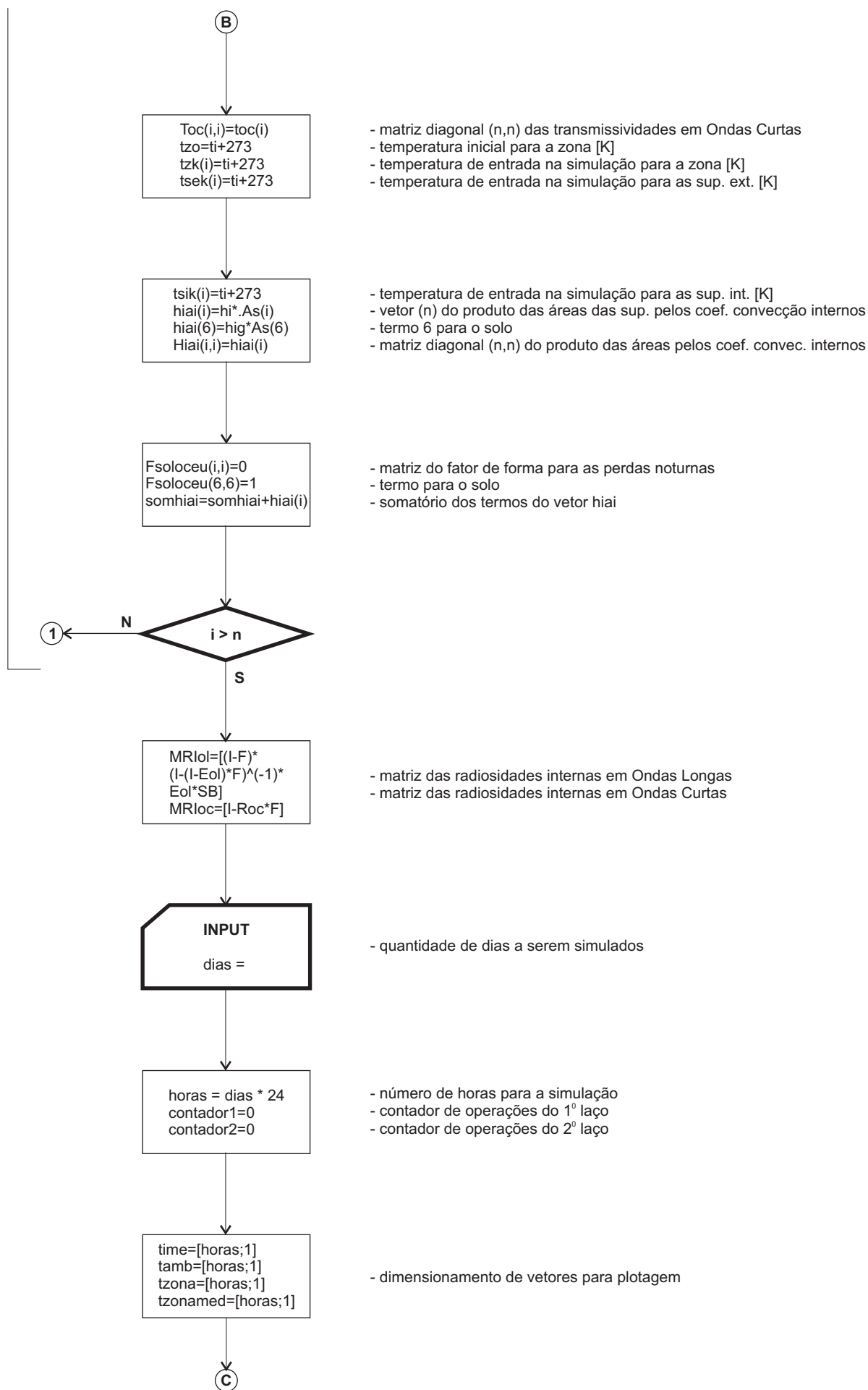
- matriz diagonal (n,n) das condutividades térmicas / espessura  
 - matriz diagonal (n,n) dos coef. de convecção internos  
 - termo 6,6 da matriz HI  
 - matriz diagonal (n,n) dos coef. de convecção externos

- termo 6,6 da matriz HE  
 - matriz identidade (n,n)  
 - matriz diagonal (n,n) das emissividades em Ondas Longas  
 - matriz diagonal (n,n) da Constante de Stephan-Boltzmann

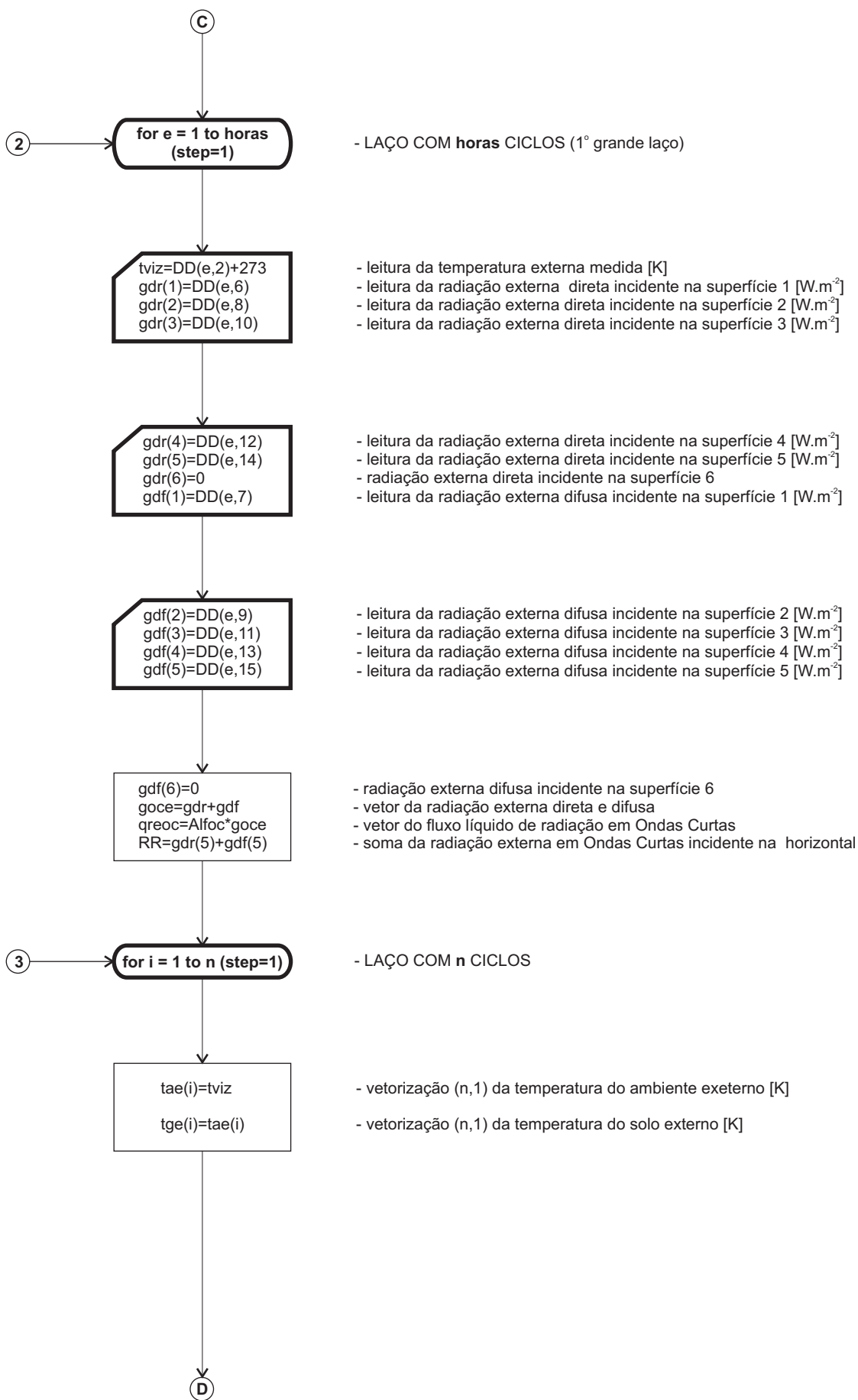
- matriz diagonal (n,n) dos Fatores de Forma entre as sup. externas e o céu  
 - termo para a cobertura horizontal  
 - termo para o solo interno  
 - matriz diagonal (n,n) dos Fatores de Forma entre as sup. ext. e o solo externo

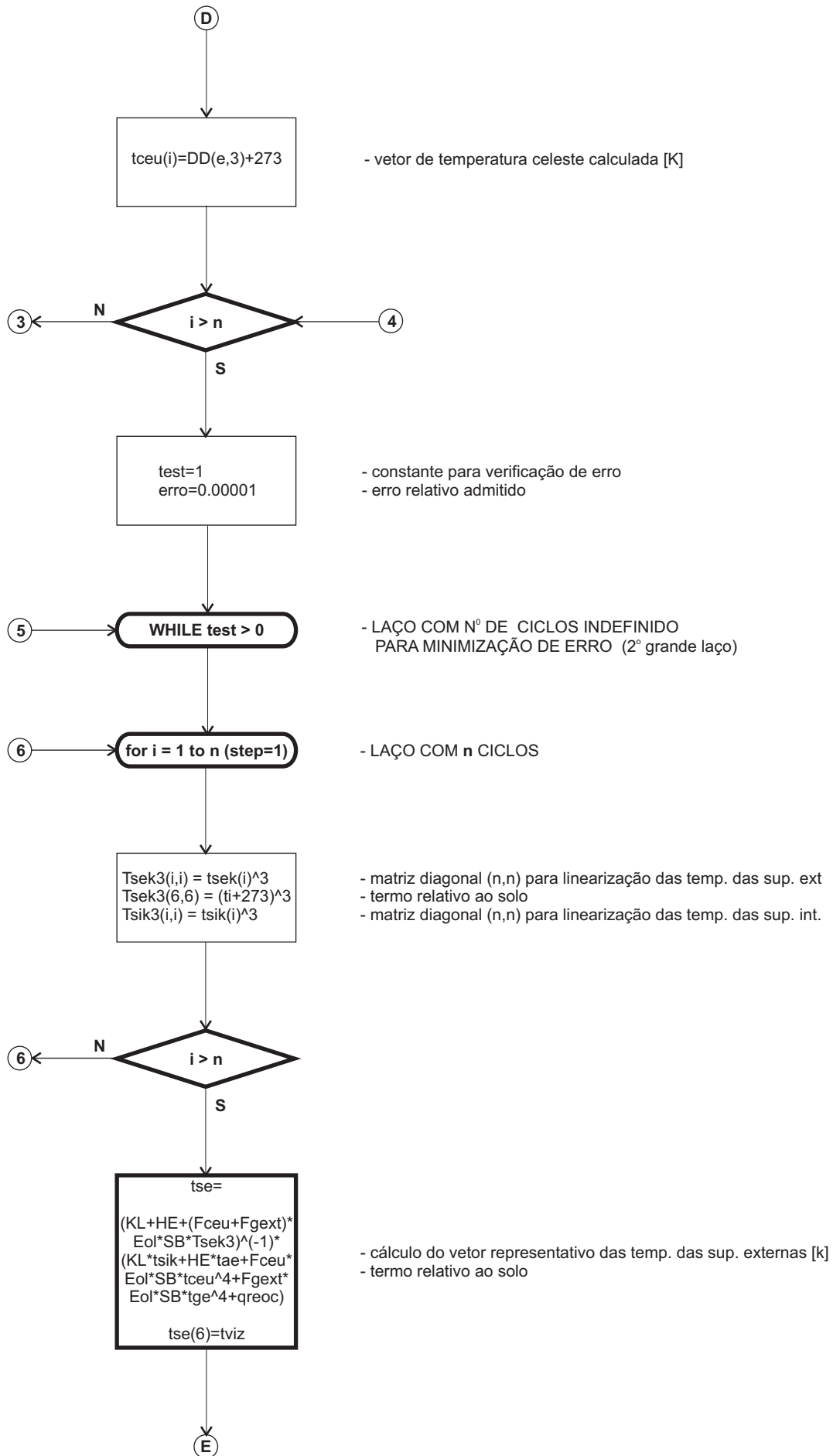
- termo para a cobertura horizontal  
 - termo para o solo interno  
 - matriz diagonal (n,n) das absorvidades em Ondas Curtas  
 - matriz diagonal (n,n) das refletividades em Ondas Curtas

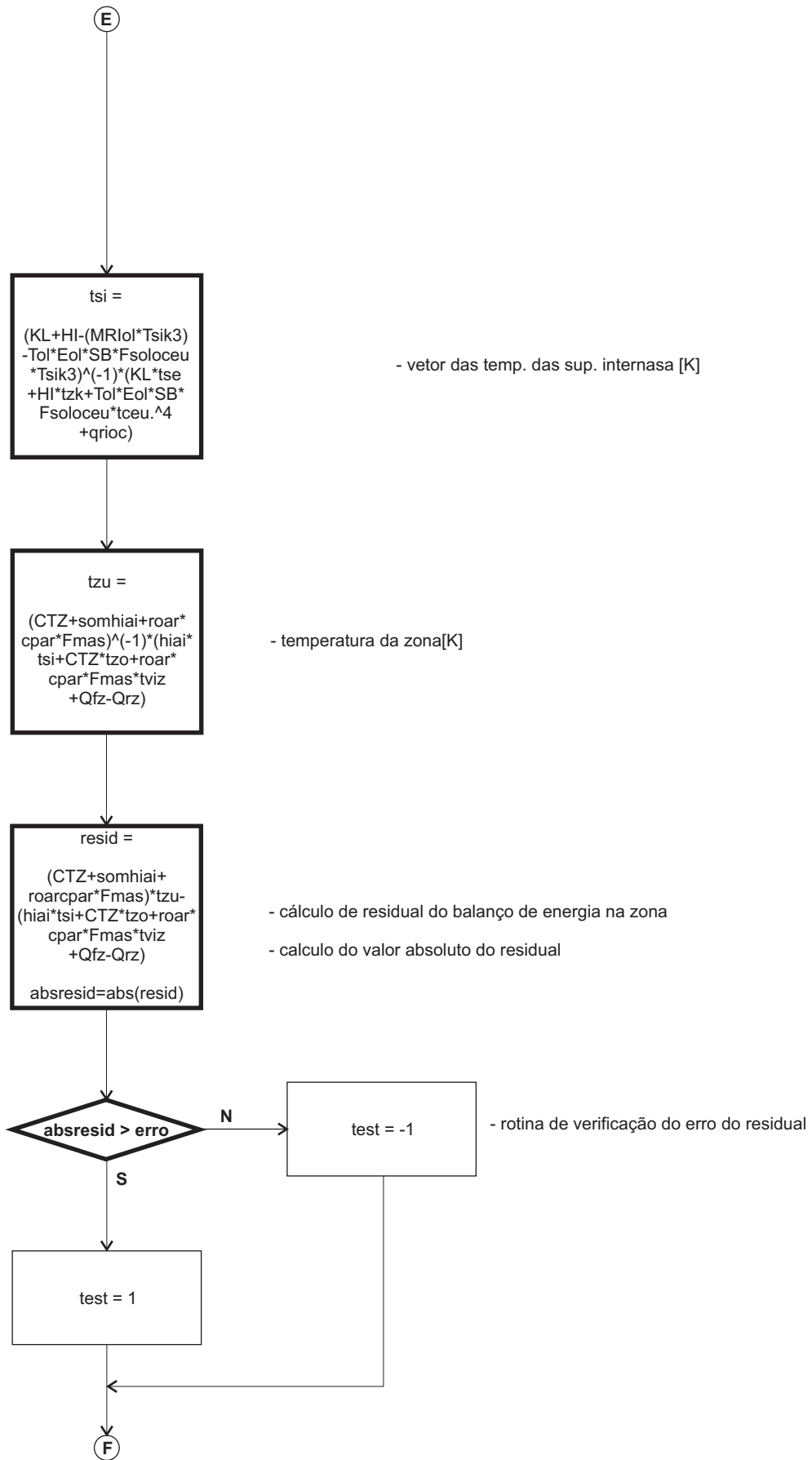


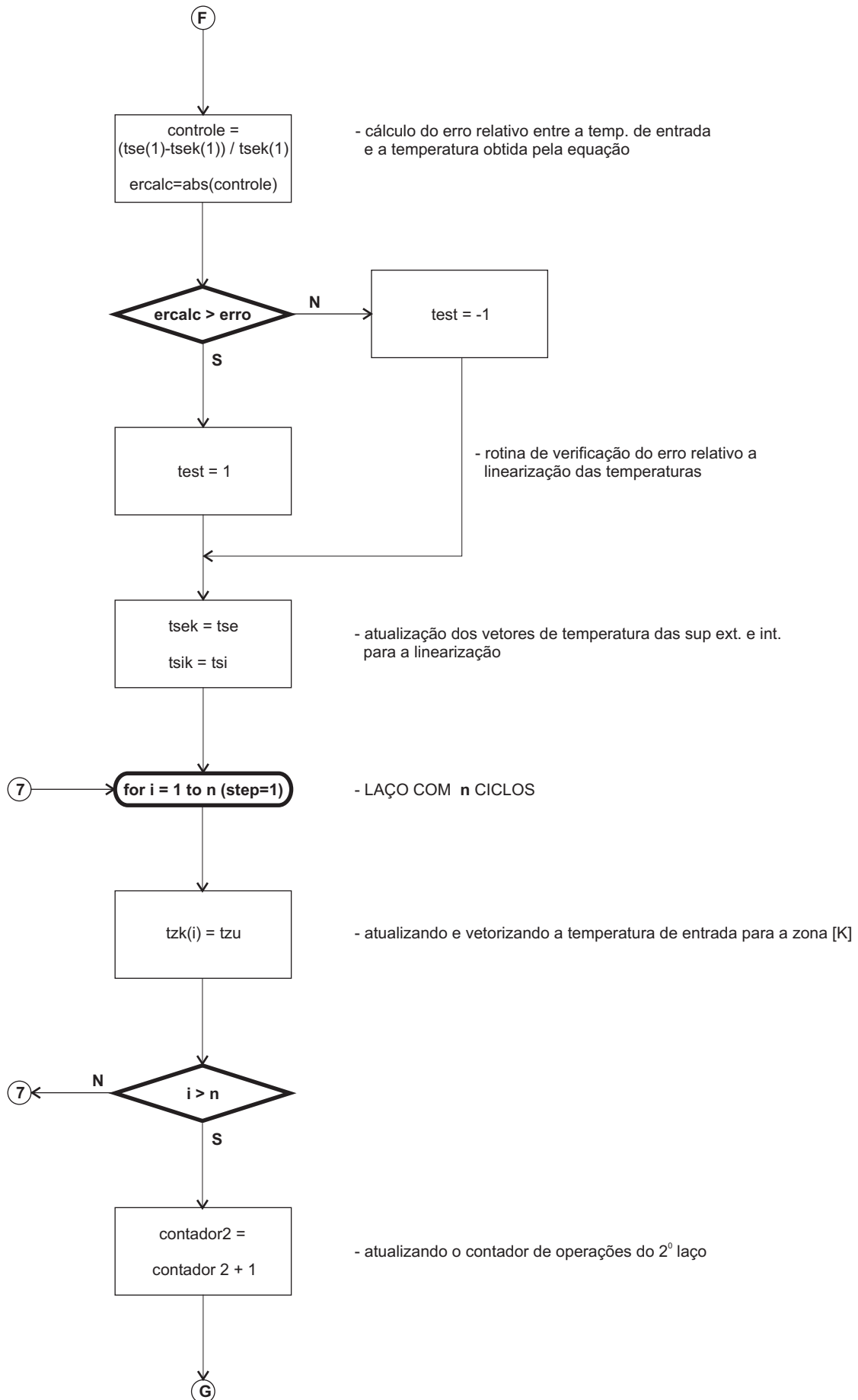


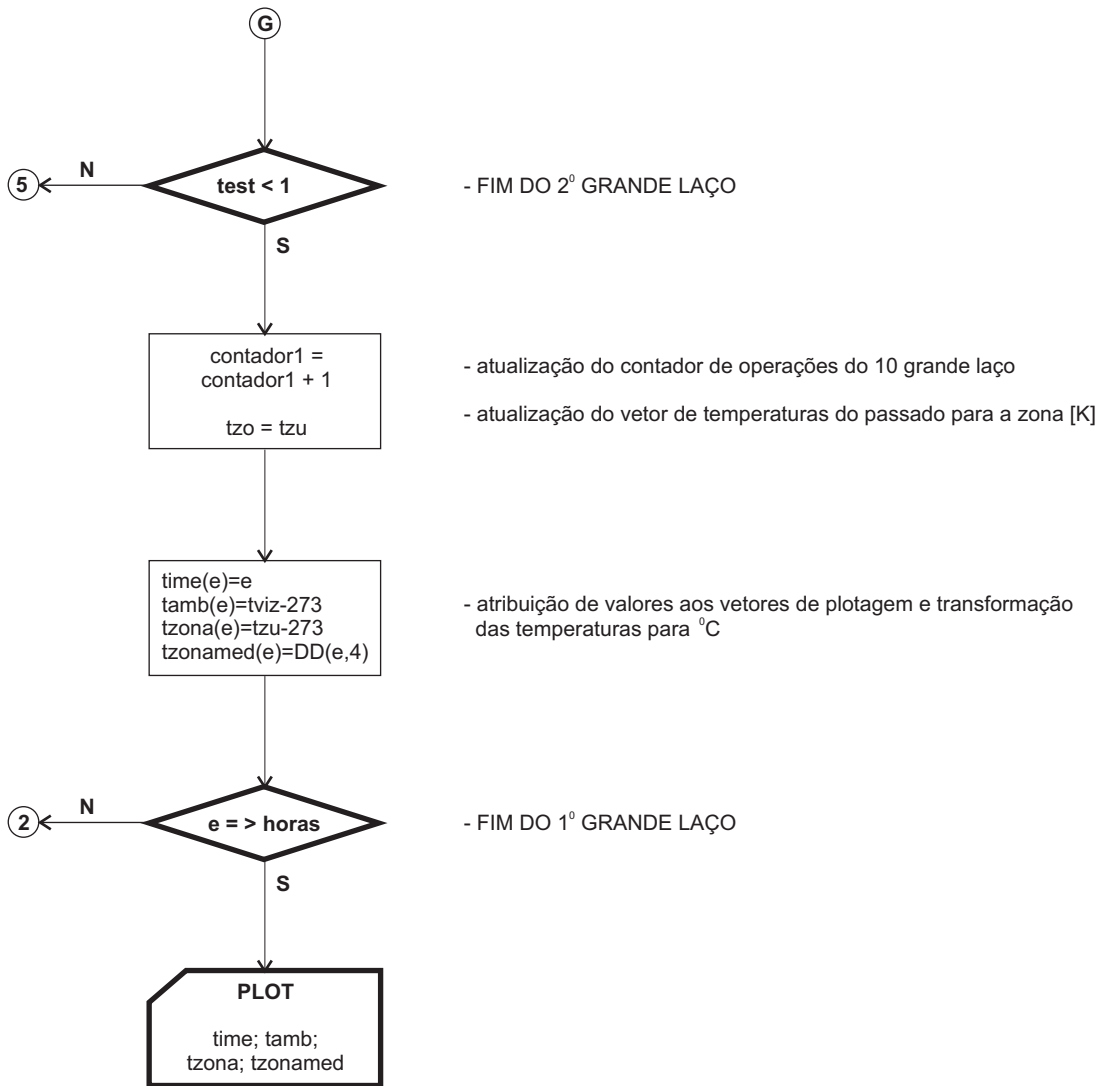
ENTRADA DE DADOS DA MATRIZ EXTERNA











ANEXO 2

LISTAGEM DA ROTINA COMPUTACIONAL

```

% prol.m

##### parâmetros pré-definidos#####
tempo=3600; %tempo para a simulação em s
dt=3600; %tempo decorrido entre as interações em s
%cont=tempo/dt;
roar=1.185; % densidade do ar a 300 K em kg/m3
cpar=1006; % calor específico do ar a 300 k em J/kg.K
nar=1; % numero de renovações do volume de ar por hora
larg=30; prof=50; altef=4; % dimensões da estufa em m
n=6; % número de superfícies considerada
hi=2; % coefic. de convecção interno para as superfícies 1 a 5 em W/m2.K
hig=1; % coef de convecção para o solo interno e a zona (6) em W/m2.K
he=5; % coef. de convecção externo para as superf. 1 a 5 em W/m2.K
kp=0.35; %condutividade térmica do polietileno
kg=1.5; % condutividade térmica do solo
lp=0.0001; % espessura da superfície de polietileno
lg=0.15; %espessura da camada de solo
ti=15; %temperatura de início da simulação em C
Qfz=0; %calor fornecido para a zona em W
Qrz=0; %calor retirado da zona em W
emol=[0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.80]; %emissividades em ondas longas
absoc=[0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.80]; % absortiviades em ondas curtas
toc=[0.8;0.8;0.8;0.8;0.8;0]; % transmissividades em ondas curtas
tol=[0.8;0.8;0.8;0.8;0.8;0]; % transmissividade em ondas longas
F=[0 0.044 0.043 0.043 0.435 0.435
    0.044 0 0.043 0.043 0.435 0.435
    0.071 0.071 0 0.014 0.422 0.422
    0.071 0.071 0.014 0 0.422 0.422
    0.058 0.058 0.034 0.034 0 0.816
    0.058 0.058 0.034 0.034 0.816 0];% F é matriz dos fatores de forma internos

As1=prof*altef; As2=As1; %área das superfícies Norte(1) e Sul(2) em m2
As3=larg*altef; As4=As3; %área das superfícies Leste(3) e Oeste(4) em m2
As5=larg*prof; As6=As5; %área da Cobertura(5) e do Piso(6) em m2
As=[As1;As2;As3;As4;As5;As6];% vetor de áreas
V=larg*prof*altef; %volume da estufa em m3
CTZ=roar*cpar*V/dt; % Capacidade Térmica do ar W/K
Fmas=V*nar/3600; %fluxo de massa de ar em m3/s
kl=[kp/lp;kp/lp;kp/lp;kp/lp;kp/lp;kg/lg]; %vetor de condutividades / espessura
roc=1-absoc-toc; %refletividades em ondas curtas
qrioc=[0;0;0;0;0;0]; qreoc=[0;0;0;0;0;0]; % vetores rad. OC interna e externa
qsiceu=[0;0;0;0;0;0]; % perdas noturna solo ceu

#####dimensionamento, formatação e atribuição de valores das matrizes e vetores
KL=zeros(n);HI=zeros(n);HE=zeros(n);Hiai=zeros(n);I=zeros(n);Eol=zeros(n);
Fceu=zeros(n);Fgext=zeros(n);Alfoc=zeros(n);MRIol=zeros(n);MRIoc=zeros(n);
Roc=zeros(n);Toc=zeros(n); SB=zeros(n); Tsik3=zeros(n);Tsek3=zeros(n);Fsoloceu=zeros(n);
tse=[n;1];tsek=[n;1];tsi=[n;1];tsik=[n;1];tz=[n;1];tzk=[n;1];tae=[n;1];
tge=[n;1];tceu=[n;1];
hiai=[1:n];somhiai=0;
gdr=[n;1]; gdf=[n;1];goce=[n;1];qrioc=[n;1];

for i=1:n
    KL(i,i)=kl(i); % matriz diagonal das condutividades / espessura
    HI(i,i)=hi; % matriz diagonal dos coef. de convecção internos
    HI(6,6)=hig; % termo relativo ao solo
    HE(i,i)=he; % matriz diagonal dos coef. de convecção externos
    HE(6,6)=0; % termo relativo ao solo
    I(i,i)=1; % matriz identidade
    Eol(i,i)=emol(i); % matriz diagonal das Emissividades em Ondas Longas
    SB(i,i)=5.67*10^(-8); % matriz diagonal da Constante de Stephan-Boltzmann
    Fceu(i,i)=0.5; % matriz diagonal para o fator de forma com o céu
    Fceu(5,5)=1; % termo relativo a cobertura
    Fceu(6,6)=0; % termo relativo ao solo
    Fgext(i,i)=0.5; % matriz diagonal para o fator de forma com o solo externo
    Fgext(5,5)=0; % termo relativo a cobertura
    Fgext(6,6)=0; % termo relativo ao solo
    Fsoloceu(6,6)=1; % termo relativo ao solo
    Alfoc(i,i)=absoc(i); % matriz diagonal das absortividades em Ondas Curtas
    Roc(i,i)=roc(i); % matriz diagonal das refletividades em Ondas Curtas
    Toc(i,i)=toc(i); % matriz das transmissividades em Ondas Curtas
    tsek(i)=ti+273; % temperatura de entrada para as superfícies externas
    tsik(i)=ti+273; % temperatura de entrada para as superfícies internas
    tzo=15+273; % temperatura do passado para a zona
    tzk(i)=ti+273; % temperatura de entrada para a zona
    haii(i)=hi*As(i); % produto hi.área da superfície
    haii(6)=hig*As(6); % termo relativo ao solo

```



```

    Hiai(i,i)=hiai(i); % matriz diagonal para hi.área da superfície
    somhiai=somhiai+hiai(i); % somatório dos hi.ai
end
MRIol=(I-F)*(I-(I-Eol)*F)^(-1)*Eol*SB;% matriz de radiosidades internas em ondas longas
MRIoc=I-Roc*F; % matriz de radiosidades internas em ondas curtas

##### entrada e leitura de variáveis
dias=input('Quantos dias deverão ser simulados? dias= ');
horas=dias*24; % transformação de dias em horas

##### vetores para plotagem #####
time=[horas;1];tamb=[horas;1];tzona=[horas;1];tsi5=[horas;1];tse5=[horas;1];tsi6=[horas;1];
tzonamed=[horas;1];
contador1=0;contador2=0; % contadores de interações

for e=1:horas ##### Primeiro Laço - entrada de dados horários

    tviz=DD(e,2)+273; % entrada de temperatura do ambiente externo

    gdr(1)=DD(e,6); % radiação direta externa na sup. Norte
    gdr(2)=DD(e,8);% radiação direta externa na sup. Sul
    gdr(3)=DD(e,10);% radiação direta externa na sup. Leste
    gdr(4)=DD(e,12);% radiação direta externa na sup. Oeste
    gdr(5)=DD(e,14);% radiação direta externa na sup. Horizontal
    gdr(6)=0;% radiação direta externa no solo interno
    gdf(1)=DD(e,7); % radiação difusa externa na sup. Norte
    gdf(2)=DD(e,9);% radiação difusa externa na sup. Sul
    gdf(3)=DD(e,11);% radiação difusa externa na sup. Leste
    gdf(4)=DD(e,13);% radiação difusa externa na sup. Oeste
    gdf(5)=DD(e,15);% radiação difusa externa na sup. Horizontal
    gdf(6)=0;% radiação difusa externa no solo interno

    goce=(gdr+gdf);
    greoc=Alfoc*goce;
    qrioc=Alfoc*(MRIoc^(-1)*F*Toc*(gdr+gdf)); %fluxo líquido interno em OC

    RR=DD(e,14)+DD(e,15); % verificando a existência de radiação solar
    for i=1:n % vetorização das temperaturas
        tae(i)=tviz;
        tge(i)=tviz;
        %tge(i)=tae(i);
        tceu(i)=DD(e,3)+273; % temperatura celeste
    end
    test=1; erro=0.00001; % constantes para cálculo de erro relativo
    while(test>0) % ##### Segundo Laço - Ajuste de erro
        for i=1:n
            Tsek3(i,i)=tsek(i)^3;% matriz diagonal das temp. ext. de entrada elev. ao cubo
            Tsek3(6,6)=(ti+273)^3; %termo para o solo
            Tsik3(i,i)=tsik(i)^3;% matriz diagonal das temp. int. de entrada elev. ao cubo
        end
        ##### cálculo do vetor tse
        tse=(KL+HE+Fceu*Eol*SB*Tsek3+Fgext*Eol*SB*Tsek3)^(-
            1)*(KL*tsik+HE*tae+Fceu*Eol*SB*tceu.^4+Fgext*Eol*SB*tge.^4+greoc);
        tse(6)=tviz;

        ##### cálculo do vetor tsi

        tsi=(KL+HI-(MRIol*Tsik3)+tol(5)*Eol*Fsoloceu*SB*Tsik3)^(-
            1)*(KL*tse+HI*tzk+tol(5)*Fsoloceu*Eol*SB*tceu.^4+qrioc);

        ##### cálculo da temp. da zona
        tzu=(CTZ+somhiai+roar*cpar*Fmas)^(-1)*(hiai*tsi+CTZ*tzo+roar*cpar*Fmas*tviz+Qfz-
            Qrz);

        % rotina para controle de erro pelo residual do balanço de energia na zona
        resid=(CTZ+somhiai+roar*cpar*Fmas)*tzu-(hiai*tsi+CTZ*tzo+roar*cpar*Fmas*tviz+Qfz-Qrz);
        absresid=abs(resid);
        if(absresid>erro)
            test=1;
        else
            teste=-1;
        end

        % rotina para controle de erro pela temperatura
        controle=(tse(1)-tsek(1))/tsek(1); % cálculo do erro relativo
        ercalc=abs(controle); % determinando o módulo do erro relativo
        if(ercalc>erro) % constante de controle do looping de verificação do erro

```

```

        test=1;
    else
        test=-1;
    end

    tsek=tse; % alterando temp. de entrada para tse
    tsik=tsi; % alterando temp. de entrada para tsi
    for i=1:n
        tzk(i)=tzu; % alterando e vetorizando a temperatura de netrada para a zona
    end
        contador2=contador2+1; % contador do looping de verificação de erro
    end % fim do segundo Laço

    contador1=contador1+1; % contador do looping total

    tzo=tzu; % atualizando a temperatura do passado para a zona

    ##### vetores para plotagem
    time(e)=e;tamb(e)=tviz-273;tsi5(e)=tsi(5)-273;
    tse5(e)=tse(5)-273;tzona(e)=tzu-273;tsi6(e)=tsi(6)-273;tzonamed(e)=DD(e,4);

end % fim do Primeiro Laço

contador1
contador2

##### Plotagens
plot(time,tamb,time,tzona,time,tzonamed)
xlabel('horas')
ylabel('Temperaturas - graus C')
grid on
title('Comportamento da Temperatura na Zona')
legend('tamb','tzona','tzonamed')

```

ANEXO 3

ARQUIVOS DE DADOS

















