

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ROBERTO CHAVES DA SILVA**

**SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO  
POR MEIO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EM  
AMBIENTE PROTEGIDO**

RECIFE, 2015

SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE  
VENTILAÇÃO POR MEIO DA DINÂMICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONAL EM AMBIENTE PROTEGIDO

**ROBERTO CHAVES DA SILVA**

Engenheiro Agrícola e Ambiental

Orientadora: Profa. Dra. **CRISTIANE GUISELINI**

Co-orientador: Prof. Dr. **RICARDO BRAUER VIGODERIS**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola da  
Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, como requisito para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Agrícola.

RECIFE, 2015

**ROBERTO CHAVES DA SILVA**

**SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO  
POR MEIO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EM  
AMBIENTE PROTEGIDO**

Dissertação defendida e aprovada em 20 de fevereiro de 2015 pela Banca  
Examinadora:

Orientadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristiane Guiselini  
DEAgri/UFRPE

Examinadores:

---

Prof. Dr. Josenildo de Souza Chaves  
DEMAT /UFRPE

---

Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida  
DEAgri /UFRPE

---

Prof. Dr. Héilton Pandorfi  
DEAgri /UFRPE

*“Porque nós somos feitos de poeira de estrelas”*

(Carl Sagan)

Bem, se você for para um lugar onde a neve está caindo.

E onde os rios gelarem, e o verão estiver terminando.

Por favor veja se ela está usando um casaco quente.

E a mantenha afastada do uivo dos ventos.

(Traduzido e adaptado da música *“Girl From The North Country”* de  
Bob Dylan)

Para a “europeia” Renata Ramos

Dedico

À família, por toda estrutura, amor e apoio dados a todo instante da minha vida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade e conhecimentos oferecidos durante a realização do curso de Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa para realização da pós graduação.

À Professora Dra. Cristiane Guiselini, pela orientação, confiança, amizade e incentivo desde do início da graduação até este momento.

Ao Professor Ricardo Brauer Vigoderis, em que com sua co-orientação, e a minuciosidade de seus ensinamentos foi de grande importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Héilton e Gledson, que além da amizade, as suas sugestões e críticas foram fundamentais neste trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e da Graduação de Engenharia Agrícola e Ambiental que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação.

Aos amigos de sempre Allan, Edson e Eduardo, pela força de sempre, a Evellinne e Gary pela ajuda no inglês.

Aos colegas do Curso de Mestrado e Doutorado em Engenharia Agrícola: Aninha, Carol, Célia, Diego, Diógenes, Diogo, Francisco, Marcelo, Natália, Nubia, Wanderson e Professor Swami, pelo convívio, apoio, amizade, dicas e pelos momentos de descontração durante a realização do curso.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Ambiência (Gpesa): Alan, Carlos, Dávilla, Gilvan, Jairo, Janice, Zé Duda, Luiz, Nicolay, Sávio, Tatiana, Thaisa e a Aline que participa diretamente deste trabalho.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Agrícola, principalmente para Manoel, Paulo e Plínio.

E por fim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	11
RESUMO .....	12
ABSTRACT .....	13
1. INTRODUÇÃO .....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	17
2.1. Principais Variáveis Meteorológicas em Ambiente Protegido .....	17
2.1.1. Radiação solar .....	17
2.1.2. Temperatura do ar .....	19
2.1.3. Umidade relativa de ar .....	20
2.1.4. Ventilação e métodos de controle em ambiente protegidos .....	22
2.2. Modelagem matemática para sistemas de ventilação em ambiente protegido.....	26
2.2.1. Introdução a Modelagem Matemática .....	26
2.2.2. Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) .....	27
2.2.3. Estudos CFD em ambientes protegidos .....	32
3. Hipótese e Objetivos .....	37
3.1. Hipótese.....	37
3.2. Objetivo Geral .....	37
3.3. Objetivo Específicos .....	37
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	38
4.1. Características do local e do ambiente protegido.....	38
4.2. Variáveis meteorológicas .....	39
4.3. Fundamentos da dinâmica de fluidos computacional .....	39
4.4. Desenvolvimento da modelagem em CFD.....	40
4.5. Condições de Contorno .....	43
4.6. Validação e análise dos resultados simulados.....	45
4.7. Uso da CFD para a modelagem do fluxo de ar no ambiente protegido .....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
5.1. Monitoramento Experimental .....	47
5.2. Validação das Simulações do Ambiente Protegido.....	50
5.3. Simulação e Comparação dos Sistemas de Ventilação .....	61

6. CONCLUSÕES.....	66
7. REFERÊNCIAS .....	67

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Visão frontal e isométrica do sistema de resfriamento através de permutadores de calor através do solo. Fonte: Mongkon et al (2013).....25
- Figura 2.** Malha computacional de um ambiente protegido, para uma geometria 2D. Fonte: Baxevanou et al (2010).....30
- Figura 3.** Influência do modelo de turbulência na taxa das trocas de ar entre dados obtidos experimentalmente e obtidos nas simulações numéricas (dados: Bartzanas et al. (2007)).....32
- Figura 4.** Diferentes configurações de entradas e saídas da ventilação natural para ambientes protegidos simuladas em CFD. Fonte: Bartzanas e Kittas (2001)..... 35
- Figura 5.** Ambiente protegido monitorado. Recife, PE. Fonte: Lucena, (2014).....38
- Figura 6.** Fluxograma apresentando todas as etapas de processamento para a modelagem em CFD.....41
- Figura 7.** Representação da configuração da camada limite atmosférica junto ao ambiente protegido.....44
- Figura 8.** Variação média diária da  $Q_g$  global ( $Q_g$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) no ambiente externo ( $Q_g$  externa), no período de 21/06/2013 a 05/07/2013, Recife, PE.....48
- Figura 9.** Variação a cada 15 min durante as horas do dia da  $Q_g$  global ( $Q_g$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) externa e internamente do ambiente protegido no dia com maior disponibilidade de  $Q_g$  (25/06/2013), Recife, PE.....49

**Figura 10.** Relação entre a  $Q_g$  global ( $Q_g$ ) durante o período entre 6h até 18h no ambiente protegido e no ambiente externo em  $W m^{-2}$ , na escala de 15 minutos do dia simulado, Recife, PE.....50

**Figura 11.** Variação da temperatura e da umidade relativa do ar horário diurnos entre as 6 até 18h no ambiente protegido e no ambiente externo em  $^{\circ}C$  e % respectivamente, na escala de 15 minutos do dia simulado, Recife, PE.....51

**Figura 12.** Malha computacional semi-estruturada representando o ambiente protegido e o seu entorno (camada atmosférica limite) para geração dos modelos CFD, Recife, PE.....52

**Figura 13.** Distribuição da  $Q_g$  global em  $W m^{-2}$ , obtidas pela simulação CFD (a-g): a) 9h30min b)10h c)11h30min d)12h30 e)13h; f)13h15min e g)14h, do dia, Recife, PE.....54

**Figura 14.** Relação entre a  $Q_g$  global obtida no monitoramento experimental e das simulações numéricas por meio da dinâmica de fluidos computacional nos diferentes horários simulados do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h), Recife, PE.....55

**Figura 15.** Perfis da distribuição da  $Q_g$  ao longo da largura do ambiente protegido simulado nos diferentes horários 9h30min, 10h, 11h30min, 12h30, 13h, 13h15min e 14h do dia simulado, Recife, PE.....56

**Figura 16.** Distribuição da Tar em  $^{\circ}C$  obtidas pela simulação CFD (a-g): a) 9h30min b)10h c)11h30min d)12h30 e)13h; f)13h15min e g)14h, do dia simulado, Recife, PE. ....57

**Figura 17.** Relação entre a Tar obtida no monitoramento experimental e das simulações numéricas por meio da dinâmica de fluidos computacional nos diferentes horários do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h), Recife, PE.....58

**Figura 18.** Perfis da variação da Tar em °C ao longo da altura do ambiente protegido simulado nos diferentes horários 9h30min, 10h, 11h30min, 12h30, 13h, 13h15min e 14h do dia simulado, Recife, PE.....59

**Figura 19.** Distribuição da UR obtidas pela simulação CFD (a-g): a) 9h30min b)10h c)11h30min d)12h30 e)13h; f)13h15min e g)14h, do dia simulado, Recife, PE.....60

**Figura 20.** Relação entre a UR obtida no monitoramento experimental e das simulações numéricas por meio da dinâmica de fluidos computacional nos diferentes horários do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h), Recife, PE.....61

**Figura 21.** Vetores indicadores da Vv (1) e distribuição do fluxo (2) nos dois tipos de sistemas de ventilação simulados em CFD, (a) sistema de ventilação natural e (b) PCAS do dia simulado, Recife, PE.....62

**Figura 22.** Distribuição da Tar no perfil vertical do ambiente protegido nos dois tipos de sistemas de ventilação simulados em CFD, (a) Sistema de ventilação natural (PCAS) e (b) PCAS, do horário simulado, Recife, PE.....64

**Figura 23.** Distribuição da UR no perfil vertical do ambiente protegido nos dois tipos de sistemas de ventilação simulados em CFD, (a) sistema de ventilação natural e (b) PACS, do horário simulado, Recife, PE.....66

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1.</b> Características da simulação CFD.....	42
<b>Tabela 2.</b> Detalhes das condições de contorno.....	44
<b>Tabela 3.</b> Propriedades dos materiais empregados.....	46
<b>Tabela 4.</b> Valores das variáveis iniciais usadas nas condições contorno de cada simulação.....	66

## RESUMO

Objetivou-se com este estudo modelar e simular, por meio de técnicas de dinâmica de fluido computacional (CFD), a interação do ambiente externo e interno de um ambiente protegido, e assim validar as variáveis micrometeorológicas monitoradas, para posterior comparação entre a ventilação natural e a indireta por permutadores de calor através do solo. O estudo contou com um ambiente protegido com cobertura de polietileno de baixa densidade (150  $\mu\text{m}$ ), com dimensões de 7,0 m de largura, 21,0 m de comprimento, 3,0 m de pé-direito e altura total de 4,5 m, localizado no município do Recife, PE, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco. A primeira fase da pesquisa foi atribuída ao monitoramento e análise das variáveis micrometeorológicas, radiação solar global ( $Q_g$ ), temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e umidade relativa do ar (UR), registradas por meio de datalogger a cada 15 min. A segunda fase consistiu na modelagem numérica de volumes finitos do ambiente protegido com validação por meio dos dados registrados, para simular os dois sistemas de ventilação propostos. Os resultados da modelagem tiveram boa concordância nas relações comparativas entre os valores medidos e os simulados, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para  $Q_g$  de 0,97,  $T_{ar}$  de 0,93 e UR de 0,93. O sistema indireto por meio de permutadores de calor através do solo apresentou melhor performance na redução da  $T_{ar}$  de até em 4 °C e na redução da UR de 15%, já o sistema de ventilação natural possibilitou a redução da  $T_{ar}$  em 1 °C, com a manutenção da UR. O uso das técnicas CFD permitiu modelar e caracterizar o ambiente protegido, assim como simular os sistemas de ventilação propostos.

**Palavras chaves:** cultivo protegido, micrometeorologia, simulação numérica

## ABSTRACT

The objective of this study was to model and to simulate, using CFD techniques, a greenhouse through the interaction of the external environment with the internal environment, and thus describe the main monitored variables: solar radiation ( $Q_g$ ,  $W m^{-2}$ ), temperature of the air ( $T_{ar}$ , °C) and relative humidity (RH%). After the validation of these models, to develop simulations of two ventilation systems (a) Natural ventilation system and (b) evaporative heat exchange system through the soil to compare and predict the microclimatic variations. The study was conducted in two phases. First, monitoring and analysis of meteorological variables of a environment located in Recife, on the campus of Rural Federal University of Pernambuco, with plastic cover (low density polyethylene) and geometric characteristics of 7.0 m wide, 21.0 m long, 3.0 m high-ceiling and 4.5 m in total height. The second phase consisted in numerical modeling of greenhouse finite volumes and thus to validate the model using the experimental data, and finally to simulate the two ventilation systems. The modeling results generally have shown good agreement in the comparative relationships between measured and simulated values, with coefficients of determination ( $R^2$ ) of 0.9722 for  $Q_g$ , 0.9347 for  $T_{ar}$ , and 0.9392 for RH. In the simulations of the ventilation systems, the indirect evaporative system using heat exchangers through the soil have shown the best performance in reducing  $T_{ar}$  at 4 °C and reduced by 15% the RH. The natural ventilation system by opening the roof axis was able to reduce the  $T_{ar}$  by 1 °C and kept the relative humidity stable. It was concluded that with the use of CFD techniques it was possible to model and to characterize the greenhouse, and to simulate ventilation systems in order to improve the conditions of temperature and relative humidity.

**Keywords:** protect cultivate, micrometeorology, CFD



## 1. INTRODUÇÃO

A principal diferença entre a produção agropecuária e os demais setores da economia consiste na exposição às condições ambientais. A agricultura é uma atividade de alto risco, uma vez que não se tem controle sobre os elementos climáticos. O conceito de agricultura moderna é produzir de forma sustentável com o menor grau de risco possível, por meio do uso intensivo de conhecimento técnico especializado e tecnologias apropriadas (ASSIS, 2006). O cultivo realizado em ambientes protegidos é uma das tecnologias que têm contribuído para a modernização da agricultura, pois, as variáveis meteorológicas como temperatura do ar, umidade relativa do ar, vento e radiação solar são modificadas pelo uso de estufas agrícolas, influenciando a produção, o desenvolvimento e o crescimento das plantas, permitindo ambientes favoráveis de produção durante todo o ano (ROMANINI et al., 2010; MARY et al., 2007; BECKMANN et al., 2006).

Condições climáticas severas durante determinadas épocas do ano, a escassez de água ou a entrada em excesso durante as estações chuvosas, o aparecimento de pragas são causas de prejuízos na produção agrícola e também fator limitante para a produção das culturas de alta qualidade. Portanto o uso do cultivo protegido permite a extensão da estação de crescimento e preveni também dos efeitos ambientais indesejáveis, ao promover proteção física conseqüentemente, modifica as variáveis micrometeorológicas no interior da estrutura (TANNY, 2013).

Guiselini et al (2010) evidenciaram que as alterações físicas promovidas pelos ambientes protegidos nos diferentes elementos meteorológicos permitiriam o aumento da qualidade, da produtividade e da sanidade das plantas cultivadas no atendimento das plantas cultivadas. Acredita-se que alterações podem ser também desfavoráveis quando não são atendidas as condições adequadas no interior do ambiente protegido, com perda de produção e qualidade do produto final, particularmente na transpiração e fotossíntese, causando assim uma desuniforme produção.

Segundo Gil et al (2011), os ambientes protegidos são estruturas fechadas, que em seu interior ocorre incremento na temperatura do ar, principalmente porque a cobertura atua como barreira para que a energia acumulada se dissipe, reduzindo também a circulação do ar no seu interior. Uma condição micrometeorológica mais heterogenia no interior dessas estruturas vem sendo o centro, há um certo tempo, das questões, de muitos estudos e pesquisas (BOULARD e WANG, 2000), e que os

métodos experimentais não são apenas suficientes para elucidar as condições das variáveis micrometeorológicas no interior dessas estruturas. E como Boulard e Wang (2002), pontua, o uso da dinâmica de fluidos computacionais (CFD – computational fluids dynamics) promove uma detalhada abordagem sobre essas questões.

Além do manejo da radiação solar através de coberturas e malhas de sombreamento, processos de ventilação no interior do ambiente protegido afetam fortemente a renovação do ar e as condições micrometeorológicas internas, influenciando no crescimento e na homogeneidade da cultura. Portanto, a ventilação se torna, também, um fator chave para o controle das variáveis ambientais no interior dos ambientes protegidos, e vários estudos experimentais apontam o impacto dos sistemas de ventilação e suas configurações no padrão e distribuição do fluxo de ar. Recentemente, o desenvolvimento da dinâmica de fluidos computacionais (CFD) aplicado a agricultura fornece a possibilidade de simular as condições micrometeorológicas em relação a um sistema de ventilação, podendo avaliar configurações desse sistema sob diferentes condições climáticas (Burnet e Boulard, 2010).

Associado aos fatores de manejo das coberturas dos ambientes protegidos, podem ser aplicados modelos matemáticos de dinâmica de fluidos computacional para a simulação de taxas de ventilação e da distribuição do ar no interior dos ambientes, como também quantificar com precisão as variáveis climáticas no interior das estufas agrícolas (KIM et al., 2008; NORTON et al., 2007; ROY e BOULARD, 2005), o que permite obter um maior controle das variáveis meteorológicas do ambiente protegido em relação as condições críticas que afetam na produção e crescimento das plantas.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Principais Variáveis Meteorológicas em Ambiente Protegido**

#### **2.1.1. Radiação solar**

A radiação solar é a força motriz para muitos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem no sistema Terra-Atmosfera, constituindo-se em um importante fator meteorológico em estudos de necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, entre outros (BORGES et al. 2010).

Entre os diversos elementos meteorológicos do ambiente, a radiação é a principal responsável pelo crescimento das plantas, não só por fornecer energia para a fotossíntese, mas também, pela sua intensidade e variabilidade regulam o desenvolvimento das plantas, por meio de receptores de luz sensíveis a diferentes intensidades, qualidade espectral e o seu estado de polarização. Dessa forma, modificações nos níveis da radiação ao qual uma espécie está adaptada podem condicionar diferentes respostas fisiológicas em suas características bioquímicas, anatômicas e de crescimento (MATOS et al 2011; ATROCH et al., 2001).

Os espectros da radiação solar relevante para as aplicações agrícolas podem ser divididas em duas faixas de ondas: (i) radiação de ondas curtas, ou global, que inclui a radiação fotossinteticamente ativa, RFA: 400-700nm, e (ii) radiação de ondas longas, que é principalmente ondas emitidas por fontes termais, e inclui o infravermelho próximo. A radiação fotossinteticamente ativa atua na fotossíntese das plantas sendo sua absorção necessária para o rendimento da produção das plantas. Já a radiação de ondas longas é significativa durante a noite, pois não há mais a presença de radiação de ondas curtas, proveniente do sol, e então ela é emitida pelo ambiente e seus componentes (TANNY, 2013).

A caracterização micrometeorológica de ambientes protegidos é essencial para a produção adequada de uma cultura. A quantidade de radiação no interior dos ambientes protegidos deve ser suficiente para o desencadeamento do processo fotossintético, grandes quantidades da radiação solar podem deixar o cultivo sob estresse, com as plantas, geralmente, fechando seus estômatos e reduzindo a produção. Frutas expostas a elevados níveis de radiação direta podem sofrer queimaduras, reduzindo significativamente sua produção comercial. Por outro lado

um extremo sombreamento pode, deteriorar a produção e rendimento devido, à falta de luz (HEMMING, 2011).

O conhecimento do balanço de energia em ambientes protegidos é de fundamental importância, pois a intensidade que a radiação é transmitida para o interior do ambiente possibilita uma modelagem micrometeorológica do ambiente e sua avaliação em relação a produção das plantas (TIWARI, 2003). O conhecimento das propriedades radiométricas, dos materiais de cobertura, como a transmitância, se faz necessário para poder modelar esse balanço de energia desse sistema, e a transmitância dos materiais de cobertura é definida como a razão entre a radiação solar externa incidente no ambiente protegido e a radiação observada no interior da estrutura, como já pesquisada em numerosos estudos e em diferentes tipos de ambiente protegidos (GUPTA et al., 2012; ELSNER et al., 2000; PAPADAKIS et al., 2000; SHAOJIN e BOULARD, 2000; STOFFERS, 1990; CRITTEN, 1989).

Vários fatores, inerentes a cobertura plástica e as condições atmosféricas, tais como nebulosidade, interferem na transmitância da radiação global para o interior do ambiente protegido, como a absorção e reflexão do material de cobertura, os processos de manufatura (espessura, coloração, aditivos, etc), deposição de sujeira, envelhecimento e a condensação do vapor d'água afetam na transmitância da radiação solar para o interior do ambiente protegido (ESPÍ et al., 2006; POLLET et al., 2005; SANTOS et al., 2004; VON ELSNER et al., 2000 ; PAPADAKIS et al., 2000).

Em relação à deposição de poeira, a transmitância do material de cobertura pode diminuir com o tempo devido ao seu acúmulo. Möller et al (2010) relataram que os valores diminuíram linearmente com o tempo, cerca de  $0,1\% \text{ dia}^{-1}$ , durante o verão sem chuvas, em que o valor inicial ficou em torno dos 90% e até o final do verão foi reduzida a 75%, já após o período de chuvas houve uma recuperação nos valores iniciais da transmitância.

A qualidade e quantidade de radiação podem desencadear nas plantas repostas tanto fisiológicas como morfológicas, sendo o principal fator na condução da fotossíntese (KUREPIN et al., 2007; LUSK e WARTON, 2007; THOMAS, 2006; DAS, 2004). Essas respostas funcionam como mecanismos de adaptação para otimizar o seu desempenho sobre os diferentes regimes do espectro da radiação solar, e assim se adaptando as várias taxas fotossintéticas, e são descritas assim como aclimatação à radiação fotossintética ativa (MATOS et al, 2009, BAILEY et al.,

2001, MURCHIE et al., 2002; WALTERS, 2005). Por exemplo, em baixos níveis de radiação as plantas precisam ser mais eficientes na interceptação da luz, e a resposta fisiológica são folhas mais largas (OGUCHI et al., 2008; VALLADARES e NIINEMETS, 2008).

### **2.1.2. Temperatura do ar**

O principal objetivo de um ambiente protegido é o de melhorar as condições ambientais em que as culturas crescem. A temperatura interna é modelada através de balanços de massa e energia. Esses saldos incluem os efeitos dos elementos envolvidos, tais como umidade, radiação solar, vento, solo, cultura produzida, entre outros (IGA, 2008). A temperatura do ar é de extrema importância para o crescimento e desenvolvimento das plantas; é também favorável à presença e proliferação de pragas e doenças; normalmente, isto é o que ocorre em ambientes protegidos, uma vez que os mesmos proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento da planta e, ao mesmo tempo, ambiente favorável às pragas, vetores de doenças e disseminação das mesmas (DUARTE et al. 2011).

Os materiais utilizados na construção de um ambiente protegido atuam formando uma barreira para a massa de ar do ambiente externo, reduzindo assim as perdas de calor convectivo no ambiente interno. E assim, as condições climáticas dentro do ambiente protegido dependem diretamente da intensidade da radiação solar, o material de cobertura, da temperatura do ar exterior, do balanço de energia, e da velocidade do vento externo (MASHONJOWA, 2010; SETHI e SHARMA, 2007)

A temperatura do ar no interior do ambiente protegido pode variar de acordo com seu volume e tamanho, bem como o tipo de cobertura, abertura ou não de janelas e cortinas, com a cobertura do solo e a incidência da radiação solar (SEEMANN, 1979). Ocorrendo assim, maior influência nas temperaturas máximas, e não afetando tanto as temperaturas mínimas e médias (SANTOS et al., 2010). Temperaturas essas que, segundo Cermeño (1993) estão intimamente ligadas ao balanço de energia.

Buriol et al., (1993) constataram que temperaturas mínimas do ar, no interior do ambiente protegido tendem a ser iguais ou ligeiramente superiores à observadas externamente, e suas variações são justificadas em função do manejo da ventilação do ambiente protegido. Quanto os valores de temperatura do ar máximas

Farias et al. (1993a) constataram um maior efeito da cobertura plástica sobre tal variável com valores da ordem de 1,2 a 4,4°C, acima das observadas externamente.

Segundo Carvalho et al. (2009), as médias de temperatura da folha do feijão-de-corda e do milho, obtiveram maiores valores para as plantas cultivadas no ambiente externo, devido a maior incidência de radiação solar nas plantas que se encontravam fora do ambiente protegido. Duarte et al. (2011), salientam que o ambiente protegido sem o uso de tela nas laterais e com cobertura de polietileno de baixa densidade (PEBD), proporcionam menores temperaturas do que em ambiente com tela nas laterais e com cobertura de PEBD.

Chavarria et al. (2008) constataram que a cobertura plástica proporcionou uma diferenciação micrometeorológica do ambiente de cultivo da videira em comparação ao cultivo a céu aberto, onde as temperaturas médias tiveram um incremento de 1 °C, enquanto as mínimas não tiveram diferença entre os dois sistemas de produção. Esse incremento médio deve-se as temperaturas máximas que tiveram médias de 31,8 e 28,0°C, para área coberta e área descoberta respectivamente.

Andrade Júnior et al. (2011) observam que a diferença da temperatura, entre o ambiente interno e externo, foi em média 1,9 °C, nos meses iniciais (julho e agosto), 1,4 °C em setembro, chegando até 2,3 °C em outubro. E os valores médios de temperatura do ar no ambiente protegido cultivado com gérberas foram superiores em 8,5% ao ambiente externo, nos meses mais quentes do ano, em especial, setembro e outubro.

### **2.1.3. Umidade relativa de ar**

Geralmente os ambientes protegidos construídos com materiais plásticos inibem a remoção e renovação vapor de água presente no interior dessas estruturas. A umidade relativa do ar no interior de um ambiente protegido é influenciada pela temperatura em uma relação inversa entre ambas (ANGELOCCI, 2002). Segundo Andriollo (2000), a umidade relativa está vinculada ao equilíbrio hídrico das plantas, em que um déficit pode alterar a evapotranspiração e a capacidade do sistema radicular de absorver água e nutrientes.

O aumento da umidade relativa do ar diminui a transpiração das plantas devido à diminuição do gradiente de concentração de vapor entre a cavidade estomática e o ar adjacente à folha, mediada pela redução do déficit de saturação de

vapor do ar (VALANDRO et al., 1999; RIGHI, 2000). O aumento da resistência ou o fechamento estomático podem ocorrer também, com baixos níveis de umidade relativa do ar, o que reduziria ainda mais a relação com a evapotranspiração máxima do cultivo (BAILLE et al., 1994).

Como também a alta umidade do ar torna propício o aparecimento de doenças fúngicas, essa alta umidade, devido a transpiração das plantas, a irrigação e o isolamento da estrutura, podem danificar a folhagem e diminuir a qualidade do cultivo (TANNY, 2013; Trigui et al., 1999; HAND, 1998; COMSTOCK E EHLERINGER, 1993). O fluxo de ar e ventilação são necessários para a remoção do excesso de calor e vapor de água do meio ambiente da planta e para um fornecimento suficiente de CO<sub>2</sub> para a fotossíntese. No entanto, ventos fortes podem causar danos físicos aos frutos e folhagens (TANNY, 2013).

O conteúdo de vapor de água presente no ar no interior de uma estufa é bastante influenciado pela evapotranspiração, pelo fato de manter o solo ou substrato permanentemente próximos a capacidade de campo por meio da irrigação, então a demanda evaporativa do ar está sempre sendo suprida (BURIOL, 2007).

Segundo Cunha et al. (2002) o crescimento e a produtividade das plantas estão diretamente relacionados com a quantidade de água disponível, sendo a maior parte desta água utilizada pelas plantas por meio da transpiração, esta que é vaporizada para a atmosfera. Assim, a umidade relativa do ar pode afetar a transpiração da planta por interferir na condutância estomática. Pode afetar indiretamente, a turgência dos tecidos e por isso altera os processos metabólicos ligados ao crescimento da planta, como por exemplo, a absorção de nutrientes (ANDRIOLO, 1999).

A umidade relativa do ar no interior do ambiente protegido, em geral, é superior à do ambiente externo, em consequência do aumento da concentração ou pressão de vapor d'água (FARIAS et al., 1993 b; SCHIEDECK et al., 1997). Por outro lado de acordo com Seemann (1979) e Farias et al. (1993b), os valores da umidade relativa do ar são inversamente proporcionais à temperatura do ar e muito variáveis no interior do ambiente protegido e no entanto.

Buriol et al. (2000) observaram que para períodos diurnos a umidade relativa é menor no interior do ambiente protegido, acompanhado de acréscimos na temperatura do ar, sobretudo em dias de céu limpo, dependentes do manejo das aberturas, e Chavarria et al. (2007) constataram que a umidade relativa do ar não

apresentou diferença significativa no cultivo da videira entre as áreas de cultivo protegido e a de céu aberto, demonstrando que esse fator pode não ser determinante para a ocorrência ou ausência de doenças fúngicas, em áreas sob coberturas plásticas.

Dalmago et al., (2006) evidenciam que devido as alterações micrometeorológicas que o ocorrem no interior do ambiente protegido, têm-se reduções em torno de 70% na evapotranspiração das culturas em ambientes com cobertura de plástico, em comparação a cultivos a céu aberto.

Guiselini et al. (2007) verificaram que os valores da umidade relativa média, máxima e mínima do ar no interior dos ambientes protegidos foram similares, porém ligeiramente superiores aos observados no ambiente externo ambos cultivados com gérbera e que a umidade relativa média, máxima e mínima do ar apresentaram variações inversas à temperatura média, máxima e mínima do ar (FARIAS et al.1994).

#### **2.1.4. Ventilação e métodos de controle em ambiente protegidos**

A capacidade de manter as condições climáticas homogêneas em um ambiente protegido depende do projeto e do desempenho do sistema de ventilação. O padrão do fluxo de ar é relacionado pela interação do ambiente externo com o ambiente interno da estufa agrícola. Ao compreender o ambiente, os produtores rurais, podem com isso otimizar os sistemas de fertilização e de irrigação e melhorar a fatores ligados à heterogeneidade meteorológica, como o consumo excessivo de água para irrigação ou perda de nitrogênio para o meio ambiente (MOLINA-AIZ et AL., 2010; BOULARD e WANG, 2002).

A ventilação é essencial em um ambiente protegido. Manter um clima favorável implica em remover o excesso de calor produzido pela alta quantidade de radiação solar (MONTEIRO et al 2001). Um bom projeto do sistema de ventilação para um ambiente protegido deve permitir um melhor controle das variáveis meteorológicas, repercutindo assim em um melhor desenvolvimento do cultivo e em também no seu rendimento. A ventilação natural é o método que permite a menor mobilização de recursos, devido principalmente ao seu baixo custo e manutenção.

A ventilação natural é o resultado da ação de duas forças naturais: A dinâmica do vento e o efeito da flutuabilidade térmica, também chamada de efeito termo-sifão (BOURNET e BOULARD, 2010; COELHO et AL., 2006). A ventilação

dinâmica é incrementada com o aumento na velocidade do vento e na superfície das aberturas; enquanto que a ventilação por efeito da flutabilidade térmica se deve pelo aumento das diferenças entre a temperatura do ar interno e externo ao ambiente protegido (KATSOULAS et al., 2006). Bounert e Boulard (2010) ainda cita detalhes nos aspectos construtivos o número de células que o ambiente protegido possui, podendo ser uma simples e de duas em diante chamadas de conjugadas. Os autores citam também que a altura do ambiente protegido, dispositivos como telas anti-insetos, malhas de sombreamento, entre outras estruturas internas e o tipo de cobertura afetam a renovação de ar no interior dos ambientes protegidos.

O aumento na área superficial das aberturas favorece principalmente ambientes protegidos com um maior pé direito, em que a flutuação térmica tem variações menos abruptas quando comparadas a ambientes protegidos de baixo volume (TORRE-GEA et al., 2013). A importância da área superficial dessas aberturas se torna mais evidente, por causa do material que envolve lateralmente todo o ambiente protegido, que em sua maioria é utilizada uma tela anti-afídica (tela que impede a entrada de insetos no interior do ambiente e consequentemente o uso de pesticidas) (TEITEL et al., 1998), mas que ao mesmo tempo dificulta a ventilação e assim podendo causar o aumento da temperatura interna no ambiente protegido (KITTAAS et al., 2002).

De acordo com Demrati et al. (2001), o uso eficiente da ventilação natural é uma importante parte na estratégia de elaboração do projeto dessas instalações, principalmente em situações em que a eletricidade é escassa ou inexistente.

No entanto, a ventilação natural por si só não é geralmente adequada para a eficiência de remover o excesso de energia durante os períodos quentes. Além disso, o aumento das taxas de ventilação pode não ser a melhor solução para minimizar o estresse sobre a cultura (KATSOULAS et al., 2009; KITTAAS et al., 2001).

Em climas tropicais, ou em locais de elevadas temperaturas e umidade durante as épocas mais quentes podem comprometer o desenvolvimento da produção, além de proporcionar maior aparecimento de doenças e pragas, e a alternativa nesses casos seria o emprego de sistemas que condicionem o ar ambiente com o objetivo de controlar a qualidade das plantas nas épocas mais quentes (MONGKON et al 2013).

O sistema de resfriamento evaporativo do ar é um processo que resfria o ar através da conversão de calor sensível em calor latente. A força motriz para a

transferência de calor e massa entre o ar e a água é a temperatura do ar e as diferenças da pressão parcial de vapor, em que uma pequena quantidade de energia é necessária para evaporar a água e assim resfriar o ambiente, principalmente quando comparada, por exemplo, com sistemas de compressão do ar elétricos (XUAN et al 2012).

Embora os sistemas de resfriamento adiabático evaporativo possam ser construídos com variadas configurações, eles não são mais do que várias combinações de três tipos básicos: resfriamento evaporativo direto (RED); resfriamento evaporativo indireto (REI) e resfriamento evaporativo semi indireto (RESI).

O sistema de resfriamento evaporativo direto (RED), e também o mais comumente utilizado, é do tipo painel-exaustor (pad-fan) em que consiste em forçar, por meio de exaustores, a passagem do ar externo, à instalação através de um painel de material poroso umedecido com água. O ar externo, quando não saturado, em contato com a superfície umedecida do painel promove a troca simultânea de calor e massa (VIGODERIS, 2002).

Já os sistemas de resfriamento evaporativo indireto (REI) é capaz de reduzir a temperatura do ar sem aumentar a umidade do ar, diferentemente do sistema de resfriamento evaporativo direto onde acontece essa elevação na umidade do ar após o painel poroso. No REI, o ar que será utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor para uma corrente de ar secundária ou para um líquido o, que foram resfriados evaporativamente. A entalpia do ar do lado seco é assim reduzida, em contraste à redução adiabática de temperatura de um refrigerador evaporativo direto (CAMARGO, 2004).

E por fim, o sistema de resfriamento evaporativo semi-indireto (RESI) é basicamente o REI em conjunto com uma cerâmica porosa, como meio permutador de calor, em que duas correntes de ar independentes estão separadas pelo material cerâmico. Em suma, seu funcionamento é semelhante ao REI normal, já antes mencionado, sendo a principal diferença o material do permutador de calor que por ser cerâmico os tamanhos dos poros são concebidos para que apenas as moléculas de água passem. Assim, não só calor, mas também existe o transporte de massa entre o ar primário e secundário (XUAN, 2012).

Atualmente existe uma forte tendência em busca de novas tecnologias de resfriamento para ambientes protegidos, e mais precisamente pela busca de sistemas

de baixo consumo de carbono como a refrigeração passiva, tendo os permutadores de calor do solo (Figura 1), que é uma espécie de arrefecimento passivo que consome pouca energia e ambientalmente segura. Esses permutadores utilizam uma fonte de energia subterrânea, baseada na transferência de calor a partir da radiação solar e das propriedades do solo. Em climas tropicais a temperatura subterrânea é menor do que a temperatura ambiente durante o dia, e devido à alta inércia térmica do solo as camadas mais profundas do solo podem ser uma grande fonte de transferência térmica (MONGKON, 2013). Vários pesquisadores (OZGENER et al. 2011; BANSAL et al., 2010; LEE e STAND, 2008; MIHALAKAKOU e LEWIS, 1996; JACOVIDES e MIHALAKAKOU, 1995;) verificaram a capacidade dos permutadores de calor do solo no resfriamento do interior de ambientes protegidos, podendo diminuir a temperatura em cerca de 8°C, no entanto, os seus desempenhos foram dependentes do ambiente de cada região onde foi conduzido os experimentos.

A modelagem adequada dos permutadores de calor do solo é parte vital da missão de um pesquisador. Vários métodos analíticos e numéricos têm sido amplamente aplicados em tal campo, devido à considerável vantagem de resolver os complexos problemas de transferência de calor. Atualmente, existem vários métodos para a modelagem desses permutadores (HEIDARINEJAD et al., 2010). Por exemplo, a fim de prever o comportamento térmico dos permutadores em relação às formações de solo circundante, vários estudos têm sido relatados por Li e Zheng (2009), Cui et al. (2008), Lee e Lam (2008), Rottmayer et al. (1997), Muraya et al. (1996), e Mei e Emerson (1985).

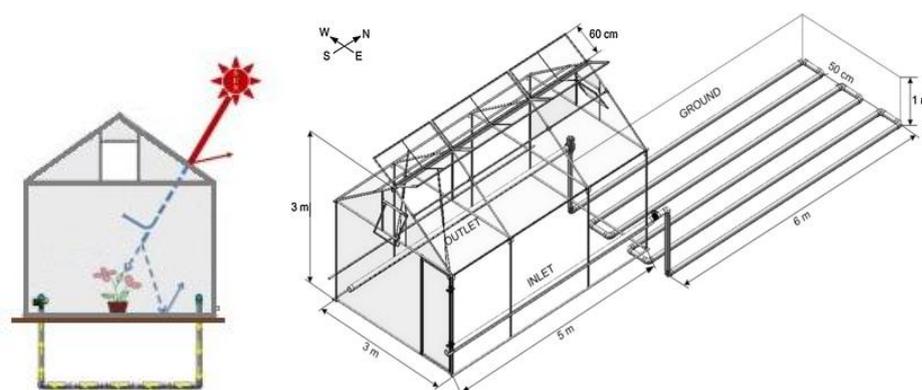


Figura 1: Visão frontal e isométrica do sistema de resfriamento através de permutadores de calor através do solo. Fonte: Mongkon et. al. (2013).

## **2.2. Modelagem matemática para sistemas de ventilação em ambiente protegido**

### **2.2.1. Introdução a modelagem matemática**

A modelagem matemática caracteriza-se pela integração da Matemática com outras ciências para solucionar um problema real com o auxílio da Matemática ou de outro conhecimento, isto é, não se restringe ao desenvolvimento e aplicação de conteúdos estritamente matemáticos (PEREIRA e SANTOS JUNIOR, 2013). Para Bassanezi (2002) a modelagem matemática é um método de pesquisa essencialmente interdisciplinar, ou seja, através de problemas matemáticos é possível investigar fenômenos ou situações físicas, químicas, biológicas, de engenharia, entre outros, e tem como objetivo fazer previsões sobre a situação ou o problema investigado. Esse conjunto de relações é chamado de modelo matemático do problema estudado. O processo dinâmico utilizado para criar e validar tais modelos é chamado de modelagem matemática.

O termo modelo é normalmente utilizado para caracterizar estruturas que representam feições e objetos ou cenários. Como explanam BAIO et al. (2004), um modelo matemático é uma estrutura que procura representar a realidade simplificadamente. Muitas vezes, os modelos matemáticos são elaborados objetivando a escolha de uma solução ótima. E uma solução ótima é uma solução viável que possui o valor mais favorável para a função objetivo, dependendo de se o objetivo é maximizar ou minimizar a função (BAIO et AL., 2013).

Os modelos numéricos estão sendo amplamente utilizados em muitas áreas para analisar ou melhorar um processo existente, e assim, desenvolver, novos projetos. As dificuldades nas observações e nas medições da experimentação como também o seu elevado custo, tornam os modelos matemáticos computacionais uma alternativa atraente. Tais ferramentas permitem aos engenheiros encontrar soluções matemáticas de um sistema físico real a ser estudado e em situações onde não se pode prever todas as variáveis presentes. Quando um modelo é validado, ele se torna um instrumento versátil para avaliar os efeitos das variáveis e prever uma determinada situação estudada (AMBAW et al., 2013; DELELE et al., 2010; PEREIRA e MACHADO, 1987).

Ao longo dos anos, é cada vez mais observado um uso mais especializado dos cultivos em ambientes protegidos, em que a principal necessidade é manter o

controle adequado do clima interno aos requisitos do sistema de produção. Em sua essência, é necessário o entendimento das interações de todas as variáveis climáticas com as trocas de calor de todo o ambiente a fim de prever as variações micrometeorológicas do ambiente protegido (NORTON et al., 2007).

O clima de um ambiente protegido está intrinsecamente relacionado com as condições do ambiente externo, os sistemas de ventilação e de controle de otimização destes não são problemas elementares e podem necessitar de experimentação extensiva (BOULARD et al. 2002; ZHANG et al. 2000). Técnicas sofisticadas que permitem descrição eficiente e precisa dos fenômenos dominantes são muitas vezes necessários. A modelagem matemática permite descrever a interação entre o sistema de produção interna, o sistema de ventilação e o ambiente externo.

A quantificação das necessidades térmicas de todas as partes do ambiente protegido, a fim de contribuir no desenvolvimento de estratégias de otimização da ventilação com ênfase no desempenho da produção, incorporando sistemas de controle do clima como também a verificação dos valores de projeto do sistema de ventilação, a combinação de parâmetros temporais e espaciais dependentes, que afetam na emissão de poluentes no interior do ambiente protegido e mensurando de forma eficiente as suas concentrações e suas variações no tempo (NORTON et al, 2007; SCHAUBERGER et al 2000).

Portanto, nos sistemas de produção agrícola, que são passíveis de descrição através das leis físicas, de movimento dos fluidos, de produção de calor e de processos de transferência de massa, podem ser efetivamente modelado de modo que os seus benefícios surgem como uma ferramenta importante para estratégias para implementação de um projeto, como também da otimização de um sistema de ventilação em cultivos protegidos (NORTON et al, 2007).

### **2.2.2. Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)**

Dinâmica de fluidos computacional (CFD) é um dos ramos da mecânica dos fluidos para a previsão e simulação, através da resolução de um processo numérico computacional de fluxo de fluidos, transferência de calor, transferência de massa, reações químicas e fenômenos relacionados. Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes introduziram o transporte viscoso nas equações de Euler, o que resultou na equação de Navier-Stokes com base no actual CFD (JEONG e SEONG, 2014; MIRANDA, 2009).

O método funciona por meio de soluções de sistemas de equações de transporte de massa e energia através de um processo numérico chamado de diferenças finitas. Esse método numérico necessita de uma discretização de um domínio de pontos criando assim uma espécie de malha, ou de uma grade de pequenos elementos (volumes de controle) para qual uma solução dessas equações possam ser obtidas, e para isso algumas transformações nas equações de transporte de massa e energia são realizadas para obter assim, um sistema de equações algébricas para o domínio de dados discretizados (KACIRA et al., 2004; BOULARD et al. de 2002; MALISKA, 1995). Norton (2013) complementa que é uma ferramenta de design bastante utilizada por engenheiros para predizer o fluxo de fluidos, transferência de calor e reações químicas dentro de sistemas complexos e que vem possibilitando os engenheiros compreender os fenômenos associados a com a produção e transformação das matérias-primas agrícolas nos alimentos nutritivos que desfrutamos hoje em dia.

A aplicação da CFD em projetos avançados de engenharia está cada vez mais sendo aplicada em estudos nas ciências agrárias, tanto no uso de sistemas de ventilação para produção animal (SAPOUNAS et al., 2004; BJERG et al., 2002), como também em experimentos em estruturas de ambientes protegidos (MISTRITIS E BRIASSOULIS, 2002). Atualmente a técnica de CFD é reconhecida como uma ferramenta poderosa para modelar aspectos micrometeorológicos no interior do ambiente protegido e para o desenvolvimento de melhorias na concepção estrutural relativamente à eficácia da ventilação (KITAS e BARTZANAS, 2007).

Nos últimos 25 anos, o uso de técnicas CFD vem aumentando para descrever a ventilação natural em um ambiente protegido tanto quantitativamente, quanto qualitativamente (MISTRITIS et al., 1997; BOULARD et al., 1999; LEE E SHORT, 2001, CAMPEN E BOT, 2003; MOLINA-AIZ et al., 2004; FATNASSI et al., 2006; BAEZA et al., 2009; TONG et al., 2009 e TEITEL et al., 2008).

Este método também foi usado para modelar sistemas de controle do ambiente, tais como cobertura plástica (MONTERO et al., 2005), sistemas de ventilação forçada (FIDAROS et al., 2008), blocos de resfriamento (SAPOUNAS et al., 2008) ou sistemas de nebulização (KIM et al., 2008), e estudar a distribuição e deposição de esporos de fungos (ROY et al., 2006) ou a dispersão de pesticidas (BARTZANAS et al., 2006). Simulações de CFD hoje são muito complexas,

incorporando as trocas radiativas entre a atmosfera e as superfícies de estufa (BOURNET et al., 2007; OULD KHAOUA et al., 2006) e a transferência de calor e vapor de água entre a cultura e o ar (BOULARD E WANG, 2002; FATNASSI et al., 2006; FATNASSI et al., 2009; ROY et al., 2008; MAJDOUBI et al., 2009).

O uso dessa ferramenta não se encontra apenas na predição da taxa de ventilação, mas também no padrão de fluxo de ar e na distribuição da temperatura e da umidade do ar dentro do ambiente protegido. Em princípio as variações micrometeorológicas são monitoradas e avaliadas no ambiente protegido, e assim é calculado a um número discreto de pontos que irá corresponder a grade espacial. Essa grade não corresponde apenas aos limites da estrutura, mas também às zonas de influência do clima externo. O domínio de cálculo é dividido em domínios elementares onde as equações de conservação são resolvidas e as variáveis (pressão, velocidade do vento, temperatura) são obtidas em cada volume de controle através de um processo iterativo que progressivamente converge para a solução do sistema não-linear de equações. E as condições de contorno devem ser impostas aos limites do domínio de cálculo, como também as possíveis condições de origem (transpiração das plantas, por exemplo) (BOURNET e BOULARD, 2010).

A escolha das características geométricas do domínio de cálculo e a discretização da grade de pontos são essenciais, uma vez que podem inferir fortemente nos resultados, Norton et al. (2007) menciona que a modelagem apenas do ambiente interno por si só pode levar a resultados errados, gerando dados irreais e conseqüentemente a simulação climática do ambiente completamente distinta da situação observada experimentalmente. E vários autores (BARTZANAS et al. 2007; LEE et al. 2007; NORTON et al. 2007; FLUENT 1998) alertam e discutiram também sobre a aspereza dessa grade, pois também pode afetar na qualidade dos resultados, pois uma grade mais refinada pode requerer cálculos mais pesados e uma mais grosseira pode reduzir a precisão dos resultados, como também aspectos de assimetria da grade onde mudanças repentinas nas células podem ocasionar erros em escala.

A Figura 2 mostra uma malha computacional gerada em uma geometria 2D com mais de 20.000 células de um ambiente protegido, com cobertura em forma de arco, com 8m de largura, 2,4m de pé direito e 4,1m de altura total.

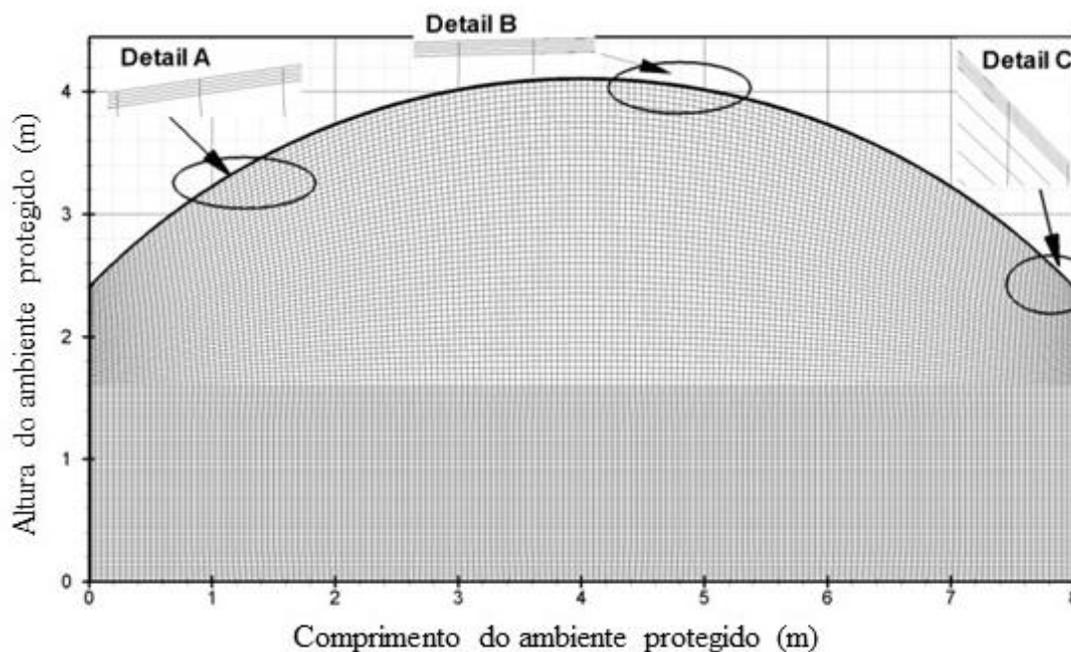


Figura 2: Malha computacional de um ambiente protegido, para uma geometria 2D.

Fonte: Baxevanou et al (2010).

Em particular, as dimensões do domínio do cálculo computacional, quanto a distribuição do fluxo de ar, deve possibilitar a descrição da camada limite e evitar a interferência da recirculação do ar criada logo atrás da estrutura. Tipicamente o comprimento da zona de cálculo pode ser até três vezes a altura do ambiente protegido a montante e sete vezes a jusante (que é correspondente ao comprimento da região de separação), e a sua altura pode ser de até cinco vezes a altura do rebordo (BOURNET et al., 2007).

Experimentos realizados no interior de ambientes protegidos fechados apresentam típicos padrões de movimento convectivo em características bi-dimensionais (LAMRANI et al. 2001), em grande partes dos estudos iniciais de CFD em ambientes protegidos verificando (por exemplo, ventilação, radiação, condensação, etc.) foram inicialmente conduzidos em 2D e, em seguida, apenas transpostas em 3D (BOURNET 2014; BOURNET e BOULARD, 2010). As validações dos resultados utilizaram parâmetros do perfil vertical do ambiente protegido, como as taxas de ventilação, e/ou temperatura e umidade relativa do ar (POUILLARD et al, 2012).

Apesar da crescente capacidade computacional dos equipamentos, o tempo de CPU necessário para realizar simulações em 3D ainda é bastante extenso, podendo a convergência numérica de uma simulação durar dias (ALI et al 2014).

De acordo com Bournet e Boulard (2010) o cálculo é um processo iterativo que exige a definição de critérios de convergência, em que os usuários dos códigos de CFD devem decidir sobre um nível adequado de interações, como também do nível residual absoluto para servir de critérios da solução, que são geralmente  $10^{-4}$  do valor de uma variável resultante onde todos os pontos da grade são utilizados (BOULARD et al 1999). A convergência mais rápida pode também ser alcançada pela otimização na forma da grade ou assumindo o modelo de Boussinesq, em vez, da criação de um problema com base na teoria dos gases perfeitos. No entanto, essa escolha pode não ser aplicável no caso de grandes gradientes térmicos e que pode ignorar a influência da temperatura sobre a viscosidade do ar.

Para simular a parte flutuante do fluxo do ar, ou seja, a turbulência, um modelo de fechamento é necessário. A turbulência é considerada por empregar as equações de Navier Stokes com Reynolds-médio (Averaged Reynolds N-S) por estes simplificar a descrição da turbulência por meio de um conjunto de médias. No entanto, a abordagem de Navier Stokes com Reynolds-médio resulta em tensões adicionais, exigindo uma teoria adicional para permitir o fechamento do sistema de equação resultante. Uma abordagem importante para alcançar este encerramento, é através da teoria da viscosidade turbulenta, que consiste em pequenos turbilhões resultantes na influência da viscosidade do fluxo (BJERG et al 2013). A maioria dos estudos de CFD em ambientes protegidos usam o padrão de turbulência  $k - \epsilon$  (FIDAROS et al. 2010; BAEZA et al. 2009; BOURNET et al. 2007a; MOLINA-AIZ et al. 2004; REICHRATH e DAVIES 2002; MISTRITOTIS et al.1997b; OKUSHIMA et al 1989), o que é bastante popular e depende da resolução de duas equações de transporte adicionais para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação ( $\epsilon$ ) (LAVE e SPALDING, 1974). Recentemente, foram adotados modelos da viscosidade turbulenta bem mais complexos, tais como o modelo RNG (Renormalization Group), com resultados que demonstram uma maior precisão na modelagem do movimento do ar dentro e ao redor de estruturas agrícolas (STAVRAKAKIS et al., 2010; SEO et al., 2009; BARTZANAS et al., 2007).

Bartzanas et al. (2007) analisaram a influência de quatro modelos de turbulência CFD comumente utilizados sobre a distribuição do fluxo de ar para

estruturas de criação de gado e ambientes protegidos. A Figura 3 compara as taxas de trocas de ar simuladas com os dados medidos experimentalmente nessas estruturas e constataram uma boa concordância para o padrão  $k-\epsilon$  standard e o modelo  $k-\epsilon$  RNG, com o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,97 e 0,98, respectivamente. Para o modelo  $k-\epsilon$  realisable o coeficiente de determinação de 0,87 e para o modelo Reynolds Stress (RS) de 0,74. A Superestimação da taxa de ventilação foi aparente para os modelos  $k-\epsilon$  standard e  $k-\epsilon$  RNG, e a subestimação para os outros dois modelos de turbulência. E as equações que melhor se ajustaram a relação entre os dados medidos ( $N_{mes}$ ) e os obtidos nas simulações numéricas ( $N_{sim}$ ) para as taxas de trocas do ar foram:

$$N_{sim} = 0.92 N_{mes} + 1.65, \text{ para o modelo } k-\epsilon \text{ standard};$$

$$N_{sim} = 1.28 N_{mes} - 0.36, \text{ para o modelo } k-\epsilon \text{ RNG};$$

$$N_{sim} = 0.73 N_{mes} + 4.6, \text{ para o modelo } k-\epsilon \text{ realisable, e};$$

$$N_{sim} = 0.7 N_{mes} + 4.4, \text{ para o modelo RS.}$$

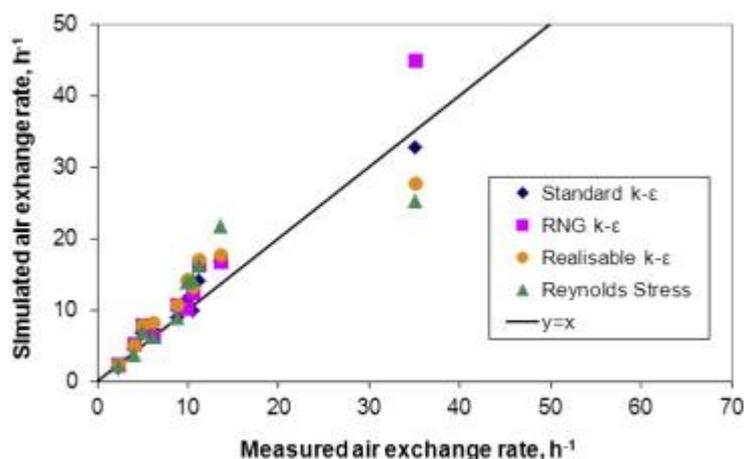


Figura 3: Influência do modelo de turbulência na taxa das trocas de ar entre dados obtidos experimentalmente e obtidos nas simulações numéricas. Fonte: Bartzanas et al. (2007).

### 2.2.3. Estudos CFD em ambientes protegidos

O uso da dinâmica de fluidos computacional, segundo López-Cruz et al., (2008), pode proporcionar aos engenheiros e empresas que fabricam ambientes protegidos, simulações realísticas entre as interações do design dessas estruturas e as condições ambientais de produção. E vários trabalhos utilizando essa ferramenta já foram realizados e mais questões a serem investigadas surgem com o passar do tempo nesse campo da engenharia agrícola.

Muitos estudos sobre ventilação natural se desenvolveram em ambientes protegidos fechados, onde não existe abertura que permite a entrada do vento. Lamrani et al. (2001) descreve que os movimentos convectivos num modelo simples de ambiente protegido (monospan), apresenta, para números de Rayleigh (numero adimensional a convecção livre) baixos e de regime transitório o padrão de fluxo tem forma de dois circuitos de ar é contra-rotativo, enquanto para maiores números ( $Ra \cong 107$ ), em regime permanente, este padrão apresenta apenas um circuito contra-rotativo de convecção que ocupa todo o volume do ambiente protegido. Monteiro et al.(2005) em uma estufa fechada de dois vãos, simulando transferências convectivas e radioativas durante a noite apresentou resultados que com dois circuitos de ar contra-rotativos melhoram e homogeneízam a distribuição da temperatura no interior da estufa.

Analisando a ventilação natural em ambientes protegidos de plástico e dois tipos de aberturas para ventilação, Muñoz-Odina (1998) determinou uma expressão empírica para o cálculo da taxa de ventilação interior em função da velocidade do vento exterior, demonstrando que não existe influência da diferença de temperatura do ar interna e externa sobre a taxa de ventilação para velocidades do vento superiores a  $1\text{m.s}^{-1}$ .

O efeito da radiação solar e térmica é frequentemente levado em conta quando se utiliza códigos CFD, para poder definir parâmetros específicos e fluxos de calor nos limites físicos do ambiente protegido, onde a relação ambiente, transferência radiativa e a cultura vem recebendo uma maior preocupação, uma vez que determina as duas principais funções fisiológicas das culturas: transpiração e fotossíntese.

Pontikakos et al. (2006) analisando dados obtidos de simulações CFD, mostrou resultados em que a temperatura do ambiente externo é um fundamental parâmetro de entrada para discretização do ambiente interno na estufa e afeta diretamente nos resultados de velocidades e direções do vento, tornando-se um crucial parâmetro.

De acordo com Molina et al. (2006), aberturas na estrutura do ambiente protegido afetam o fluxo de ar, a taxa de ventilação e na distribuição de temperatura numa estufa, onde a temperatura média do ar no meio variou de  $28,2$  a  $32,9$  °C com uma temperatura do ar exterior de  $26$  °C, há foram as regiões dentro da estufa que foram de  $13$  °C mais quente quando comparados a temperatura do ambiente externo.

E segundo Baxevanou (2010) e Majdoubi et al. (2009), a convecção e a radiação são as formas dominantes de transferência de calor, onde as medições mostram que as diferenças entre a temperatura do ar dentro e fora do ambiente protegido está fortemente ligada à radiação solar e em segundo lugar a velocidade do vento.

No entanto Chow e Hold (2010) obteve as seguintes conclusões sobre o estudo dessas formas de transferência de calor, flutuabilidade e sobre os gradientes térmicos para edifícios:

- a) A radiação térmica sem a participação de ar altera a distribuição da temperatura do ar por irradiação de energia térmica na zona superior da parede para a zona inferior da parede, que, em seguida, afecta a temperatura do ar por condução e convecção;
- b) A inclusão de valores de absorção do ar aumenta o efeito da redistribuição térmica radiativa, permitindo que o ar absorva e irradie calor, reduzindo os gradientes de temperatura ainda mais;
- c) Condições de fronteira térmica e de cargas de calor afetam na predição dos limites absolutos da temperatura, mas não afeta na distribuição da temperatura.

Bartzanas e Kittas (2001), afim de otimizar o design de ambientes protegidos mono-span, utilizou o código CFD para simular e prever várias configurações de entradas e saídas da ventilação natural no interior dessas estruturas. Eles realizaram simulações com geometria em 2D estáveis, negligenciando a flutuabilidade e considerando o vento como principal força motriz, e então estudaram quatro configurações (Figura 4) de um ambiente protegido de plástico com cobertura tipo arco: (1) aberturas somente nas laterais (tipo roll-up) no meio das paredes; (2) idêntico ao 1, mas com aberturas laterais situadas na parte superior da parede; (3) idêntica à 1, mas com aberturas do tipo de janela articulada; e (4) idêntico ao 1, mas com uma abertura no meio do telhado. Resultando que as taxas de renovação do ar do caso 4 são o dobro do que no caso 1, concluindo que a configuração 4 é o mais eficiente, enquanto a configuração 1 é a menos eficiente.

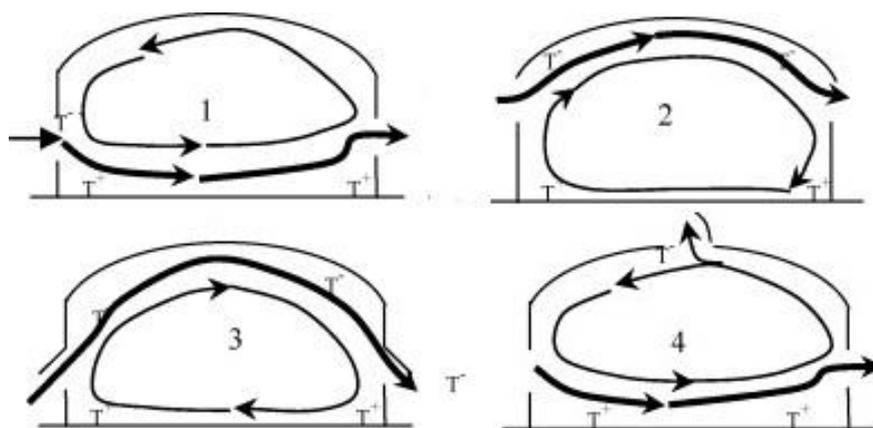


Figura 4: Diferentes configurações de entradas e saídas da ventilação natural para ambientes protegidos simuladas em CFD. Fonte: Bartzanas e Kittas (2001).

A dinâmica de fluidos computacional uma ferramenta poderosa para analisar numericamente a umidade no interior dos ambientes protegidos. Onde na última década a interação do ambiente com a cultura recebeu especial atenção (BOURBON et al. 2014). Geralmente as definições da cultura na modelagem, as considera como um meio poroso como termo em que a equação de Darcy-Forchheimer é resolvida (TEITEL et al., 2008; MOLINA-AIZ et al., 2004). No entanto, é geralmente aceito que as variações no potencial de pressão entre ambiente e cultura contribua em maior parte das trocas gasosas (BARTZANAS, BOULARD, e KITTAS 2004). E que essas trocas gasosas também servem de fonte nas trocas de calor onde o vapor d'água, onde o calor sensível específico e os fluxos de calor latente também devem ser estimados e esses fluxos são também ligados pela radiação (BOURBON et al. 2014). O uso de submodelos das culturas foram primeiramente empregados por Boulard e Wang (2002) e em seguida, re-utilizados e aprimorados por diversos autores (KICHAH et al., 2012; MAJDOUBI et al., 2009; NEBBALI et al., 2012; FATNASSI et al., 2006; BARTZANAS et al., 2004). Já sobre o transporte da umidade e de suas mudanças de fase (condensação), e seus efeitos micrometeorológicos ainda existem poucos estudos em CFD (PISCIA et al., 2012a; PISCIA et al., 2012b). Essas simulações podem estimar também, e com grande precisão, as necessidades de água para o cultivo, pois de acordo com Demrati et al (2007), é possível visualizar graficamente áreas do ambiente protegido onde a diferentes variações na umidade relativa, indicando setores menos úmidos. Como

também onde o excesso da umidade relativa do ar pode indicar a falta ou deficiência de um sistema de ventilação e assim permitindo onde deve atuar o sistema para a extração desse excesso de vapor d'água (CAMPEN 2008).

### **3. Hipótese e Objetivos**

#### **3.1. Hipótese**

Se é possível por meio das ferramentas e códigos da dinâmica de fluidos computacionais (CFD) simular e prever várias configurações de sistemas ventilação em um ambiente protegido.

#### **3.2. Objetivo Geral**

Objetivou-se com este estudo modelar e simular, por meio de técnicas de dinâmica de fluido computacional (CFD), a interação do ambiente externo e interno de um ambiente protegido, e assim validar as variáveis micrometeorológicas monitoradas, para posterior comparação entre a ventilação natural e a indireta por permutadores de calor através do solo.

#### **3.3. Objetivo Específicos**

- Descrever a movimentação do fluxo de ar no interior do ambiente protegido;
- Caracterizar a variação da radiação, temperatura e da umidade relativa do ar através de perfis gráficos no interior do ambiente protegido;
- Validar as simulações para que esteja de acordo com as condições micrometeorológicas do ambiente protegido estudado durante a fase experimental;
- Simular e comparar a troca de massa e energia entre dois sistemas de ventilação, um natural e um sistema indireto por permutadores de calor através do solo.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Características do local e do ambiente protegido

As simulações foram baseadas nos dados registrados entre 21 de junho a 02 de agosto de 2013 (Lucena, 2014), no interior de um ambiente protegido e na estação automática meteorologia existentes junto à área experimental do Departamento de Agronomia e do Departamento de Engenharia Agrícola, respectivamente, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, no município de Recife, PE, latitude 8° 04' 03" S, longitude 34° 55' 00" W e altitude 4 m.

O clima da região é caracterizado como megatérmico (As<sup>0</sup>) com precipitação de inverno e com estação seca do verão até outono, segundo classificação de Köppen (PEREIRA et al., 2002). A temperatura média anual no Recife é de 25,2 °C. As temperaturas mais elevadas na região são em Janeiro, com máxima de 30 e a mínima de 25 °C. Julho é o mês mais frio na capital de Pernambuco, a máxima é de 27 e a mínima de 22 °C (CHESF, 1987; SENTELHAS et al., 1999; MME, 2003).

As características geométricas do ambiente protegido apresentavam dimensões de 7,0 m de largura, 21,0 m de comprimento, 3,0 m de pé-direito e 4,5 m de altura total. Cobertura em forma de arco, coberto com plástico de polietileno de baixa densidade (150 µm) leitoso e a lateral de tela plástica anti-afídica com porosidade de 3,2 µm. Rente e internamente a cobertura plástica foi instalado uma malha termo refletora (Figura 5).



Figura 5: Ambiente protegido monitorado. Recife, PE. Fonte: Lucena (2014).

## 4.2. Variáveis meteorológicas

Para a geração das simulações, as variáveis meteorológicas internas e externas ao ambiente protegido foram mensuradas: radiação solar ( $Q_g$ ,  $W\ m^{-2}$ ;  $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ ) temperatura do ar ( $T_{ar}$ ,  $^{\circ}C$ ), umidade relativa do ar (UR, %), e vento ( $m\ s^{-1}$ ) que foi medido apenas externamente. O ambiente protegido foi monitorado por uma plataforma automática de registro de dados meteorológicos (Datalogger Campbell®, modelo CR1000) localizada no centro geométrico do ambiente protegido, a altura de 1,5 m do solo, para registros contínuos de dados meteorológicos.

Para o ambiente externo, foi utilizada uma estação meteorológica, próxima à área do experimento (200 m), com aquisição de dados automática (Datalogger Campbell®, modelo CR1000) e foram registrados:  $Q_g$ ,  $W\ m^{-2}$  e  $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ ;  $T_{ar}$ ,  $^{\circ}C$ ; UR, % e  $V_v$ ,  $m\ s^{-1}$ , com registros a cada 5 s, calculadas médias a cada 15 min, 60 min e 24 h (LUCENA, 2014).

## 4.3. Fundamentos da dinâmica de fluidos computacional

A dinâmica de fluidos computacional está baseada nas equações que governam a dinâmica de fluidos (continuidade, momento e energia). Essas equações são obtidas diretamente de um volume ou um elemento fixo, em um sistema conservativo.

Na equação de continuidade: os fluxos de massa entrando em um elemento de fluido devem se igualar exatamente com aqueles que saem (Eq. 1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Equação de momento (modo conservativo): a soma das forças externas que atuam sobre a partícula de fluido é igual à sua taxa de variação do momento linear (Eq. 2).

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -p \delta_{ij} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

A conservação de energia (segunda lei da termodinâmica): a taxa de variação da energia de uma partícula de um fluido é igual à adição de calor e o trabalho realizado sobre a partícula (Eq. 3).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = S_T \quad (3)$$

As técnicas CFD aplicam essas leis de conservação ao longo de um domínio do fluxo discretizado, a fim de calcular as mudanças sistemáticas em massa,

momento e energia, para com o fluido que atravessa as interfaces de cada região discreta (Versteeg e Malalsekeera, 1995).

Para descrever a intensidade da radiação solar em materiais transparentes, como o plástico das coberturas utilizados nos ambientes protegidos, foi utilizado o método das ordenadas discretas (DO) para a resolução da equação de transferência radiativa (RTE) dada por (Eq. 4).

$$\frac{dI_{\lambda}(\vec{r}, \vec{l})}{dl} + K_{\lambda} \cdot I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{l}) = K_{\lambda} \cdot I_{b\lambda} \quad (4)$$

Em que  $r$  é o vetor de posição  $l$  é sentido,  $K_{\lambda}$  é o coeficiente de absorção monocromática,  $I_{\lambda}$  é a intensidade monocromática e  $I_{b\lambda}$  é a intensidade de corpo negro dada pela função de Planck.

#### **4.4. Desenvolvimento da modelagem em CFD**

A modelagem em CFD foi dividida em 3 etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (Figura 6) (NORTON et al 2007; VERSTEEG e MALALASEKERA 2007)

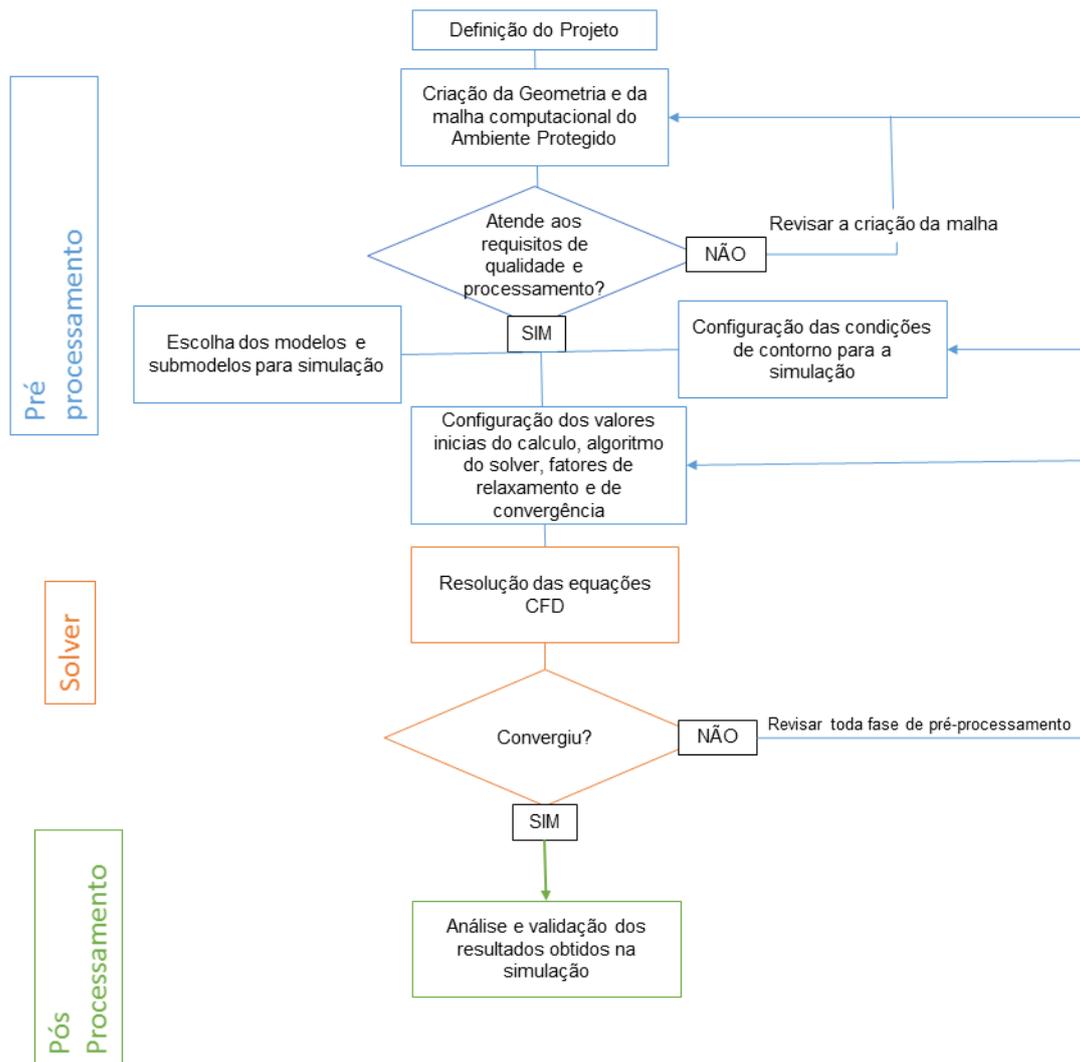


Figura 6: Fluxograma das etapas de processamento para a modelagem em CFD.

A etapa de pré-processamento foi subdividida na criação e na definição da geometria do ambiente protegido, em que se gerou a malha computacional quanto aos números de elementos e nós, independência numérica, e por fim nas condições de contorno do modelo físico estudado, desde propriedades dos materiais utilizados, condições iniciais do ambiente de domínio da simulação até as resolução das equações e seus parâmetros de convergência (Tabela 1).

Tabela 1: Características da simulação CFD

Método de discretização interativa <i>Software</i>	Método de Volumes Finitos Ansys Fluent v.15
<b>Algoritmos e controles da solução:</b>	
Algoritmo de Pressão e Velocidade	SIMPLE
Tempo	Estacionário
Geometria	2D
Formulação	Implícita
Processamento	Baseado em Pressão
<b>Modelos utilizados</b>	
Energia	Ativo
Turbulência	k- $\epsilon$ ; RNG; funções das paredes padrão
Radiação	Ordenadas discretas
Umidade Relativa	Transporte de espécies (ar + vapor d'água)

Processamento: Nesta etapa, também chamada de *solver*, foi destinada completamente para as resoluções numéricas, ou seja o software organizou todos os dados de entrada em matrizes numéricas e as resolveu por métodos iterativos de volumes finitos.

O software usado para as simulações em CFD foi o ANSYS FLUENT v.15, onde todas as variáveis físicas e meteorológicas utilizadas para a computação dos dados estiveram no sistema internacional (SI);

A geometria utilizada do ambiente protegido foi modelada em duas dimensões (2D), com suas aplicabilidades propostas de acordo com os apontamentos de Ali et al. (2014). Os números de elementos e de nós obtidas foram avaliadas quanto a parâmetros de qualidades utilizadas pelo próprio software, como também a capacidade de processamento computacional (tempo de cálculo) e comparando-o com geometrias do ambiente protegido semelhantes da literatura consultada;

Foi empregado uso do algoritmo Semi Implicit Linked Equations (SIMPLE) para a resolução do acoplamento entre pressão/velocidade do vento. Fatores de relaxamento também foram considerados, quando houve a tendência de linearização dos resultados, durante o processo de convergência. E os critérios de convergência

adotados foram: para as equações da continuidade, velocidade do vento e turbulência:  $10^{-4}$ ; equações de energia, radiação e umidade relativa:  $10^{-6}$ .

O pós-processamento constituiu nas análises dos resultados das simulações. Em que, de forma gráfica, por meio de linhas de contorno, vetores foram gerados para apresentar os resultados obtidos, e, também foi analisado problemas ocorridos por inconsistências da geometria, baixa qualidade da malha computacional, ou ainda erros na determinação das condições de contorno.

#### 4.5. Condições de Contorno

As condições de contorno foram aplicadas de acordo com as situações críticas analisadas durante a fase experimental, que consistiu na avaliação dos dados obtidos pela estações meteorológicas e na definição de situações, onde houve a condição mais extrema da radiação solar média de todo o período monitorado.

Foram considerados como condições iniciais os valores observados entre os horários: 9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h do dia simulado para a utilização nos modelos CFD, a fim de gerar uma série de modelos das condições iniciais do ambiente protegido e também, para que os sistemas de ventilação e suas configurações pudessem ser comparadas.

Então esses dados foram dispostos no domínio geométrico de cálculo como valores de entrada, com as seguintes configurações (Tabela 2).

Tabela 2: Detalhes das condições de contorno

Condições iniciais	Configuração (valor)
Lateral Esquerda ao ambiente protegido	Entrada de vento (depende do horário do dia)
Lateral direita ao ambiente protegido	Saída da pressão atmosférica local
Topo do ambiente protegido	Incidência da Radiação (depende do horário do dia)
Cobertura	Semi-transparente
Malhas anti-afídicas	Opaco (Temperatura inicial)
Solo	Opaco (Temperatura inicial)

O domínio geométrico de cálculo foi discretizado em uma malha não estruturada, constituída do entorno ao ambiente protegido, chamada por Norton et al.

(2007) de camada de limite atmosférico, com largura de 25 m e altura de 14 m, junto também com a geometria do ambiente protegido (Figura 7);

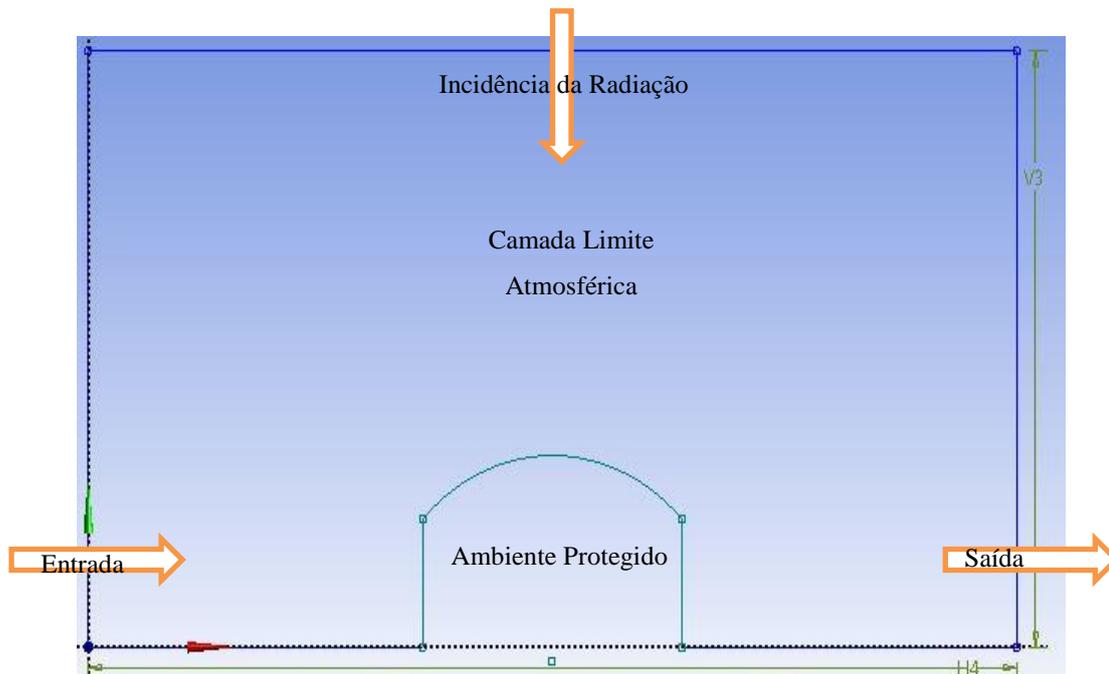


Figura 7: Representação da configuração da camada limite atmosférica junto ao ambiente protegido.

A lateral esquerda ao ambiente protegido foi definida como entrada de vento e a lateral direita ao ambiente protegido definida como saída da pressão atmosférica local, ou seja com valores constantes em todas simulações de 1 atm. O contorno a cima do ambiente protegido configurou-se como a entrada da radiação solar no sistema e também da temperatura do ambiente externo, e com transferência térmica por métodos radiativos e convectivos.

A cobertura do ambiente protegido foi definida como um material semi-transparente, de polietileno de baixa densidade, e como está associada a uma malha termorefletores a cobertura plástica, essas conjunções foram configuradas como materiais 99% difusor da radiação solar incidente. Já as malhas anti-afidicas foram consideradas opacas, de polietileno de baixa densidade e porosidade de  $3,2\mu\text{m}$  e na base do domínio geométrico de cálculo o solo de textura arenosa.

A modelagem da umidade relativa considera o ar como uma mistura do ar seco + ar com vapor d'água, sem nenhuma interação química e sua mistura é considera como um gás ideal, então os valores utilizados, foram convertidos para a

fração de massa de água, proposto por Albright (1990) e considerados em todo o domínio de cálculo.

As propriedades físicas e térmicas dos materiais que envolve todo o domínio de simulação foram definidos, ou seja, os materiais fluidos como o ar e o vapor-de-água, e também os materiais sólidos como os plásticos empregados na cobertura, e nas malhas anti-afidicas laterais e o solo de textura arenosa do piso do ambiente protegido foram configurados dentro do banco de dados de materiais do *software* utilizado (Tabela 3).

Tabela 3: Propriedades dos materiais empregados.

Materiais	Propriedades		
	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Transferência de Calor (w m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Calor específico (J kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )
Ar	1.225	0.0242	1006.43
Vapor-de-água	0.5542	0.0261	-*
Polietileno de baixa densidade	920	0.33	1900
Solo	1900	0.78	2200
Alumínio(PCAS)	2719	202.4	871

\*O calor específico do Vapor-de-água é considerado polinomial-variável pelo *software*.

#### 4.6. Validação e análise dos resultados simulados

Seguindo os apontamentos de Boulard e Bournet (2010) para a validação foi observada tanto na comparação com os dados experimentais de Qg, Tar e UR, como também na convergência das equações na etapa de processamento.

Os dados experimentais adquiridos pelos sensores no interior do ambiente protegido foram utilizados para a validação, comparando uma sequência de simulações realizadas para descrever horas do dia, pela manhã do dia simulado (25/06/2013), os pontos de amostragens da simulações corresponderam ao da localização da estação meteorológica do interior do ambiente protegido, e assim, os inserimos em gráficos de regressão linear, para comparar os dados obtidos durante a fase experimental com os dados obtidos durante as simulações, assim foi avaliado os níveis de concordância.

#### 4.7. Uso da CFD para a modelagem do fluxo de ar no ambiente protegido

A modelagem matemática por meio da dinâmica de fluidos computacional foi empregada para a predição e simulação da ventilação (velocidade e taxa) e de distribuição dos fluxos de ar para o ambiente protegido estudado, assim como para a simulação, predição e comparação de dois sistemas de ventilação: um sistema de ventilação natural, através de uma abertura no topo da cobertura da estrutura, e resfriamento indireto com permutadores de calor através do solo, com o intuito de estimar sua aplicabilidade no planejamento e manejo das variáveis micrometeorológicas. Para todas as simulações foram consideradas as taxas de ventilação máxima calculada pelo *software*.

O sistema de ventilação natural através da abertura no topo da cobertura consistiu em uma janela móvel de 50 cm, do lado oposto da entrada da camada limite atmosférica e a sua condição de contorno como saída de fluxo de ar.

A simulação com sistema de resfriamento indireto via permutadores de calor através do solo (PCAS), foi conduzida pela técnica desenvolvida por Mongkon et al. (2013) e adaptada para as condições de simulação, a temperatura superficial do solo obtida na simulação que caracteriza o ambiente protegido foi considerada como dado de entrada para que o sistema de resfriamento pudesse ser avaliado, junto com as propriedades térmicas do solo, que por condução transferiu energia para o seu interior e conseqüentemente para os tubos. A característica desse sistema constituiu basicamente de tubos conectados,, em que a entrada de ar foi injetada no interior de umas das laterais da estufa agrícola, passando por tubos enterrados numa camada de solo a 1 m de profundidade e junto à outra fonte de entrada de ar para a diminuição do vapor d'água contido na primeira corrente de ar, e por fim, o ar resfriado é descarregado em vários pontos do ambiente protegido.

A simulação em 2D, por simular os perfis verticais do ambiente protegido, correspondeu a um desses pontos de difusão do ar resfriado. O tubo de alumínio foi configurado com o diâmetro de 0,08 m e a descarga dupla de vazão com velocidade entrada no tubo de  $1 \text{ m s}^{-1}$  e UR de 73%. Os 10 cm iniciais do tubo foi configurada no *software* como *moving wall* a uma velocidade de ar de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  e na saída do tubo foi configurada como saída de fluxo de ar.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Monitoramento da radiação solar global

A variação da radiação global ( $Q_g$ ) diária em  $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  registrada externamente ao ambiente protegido, ao longo do período de monitoramento (21/06 até 02/08/2013), teve como valor médio diário  $12,23 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . O dia de maior incidência de  $Q_g$  aponta para 25/06/2013 com valor total de  $15,78 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  (Figura 8).

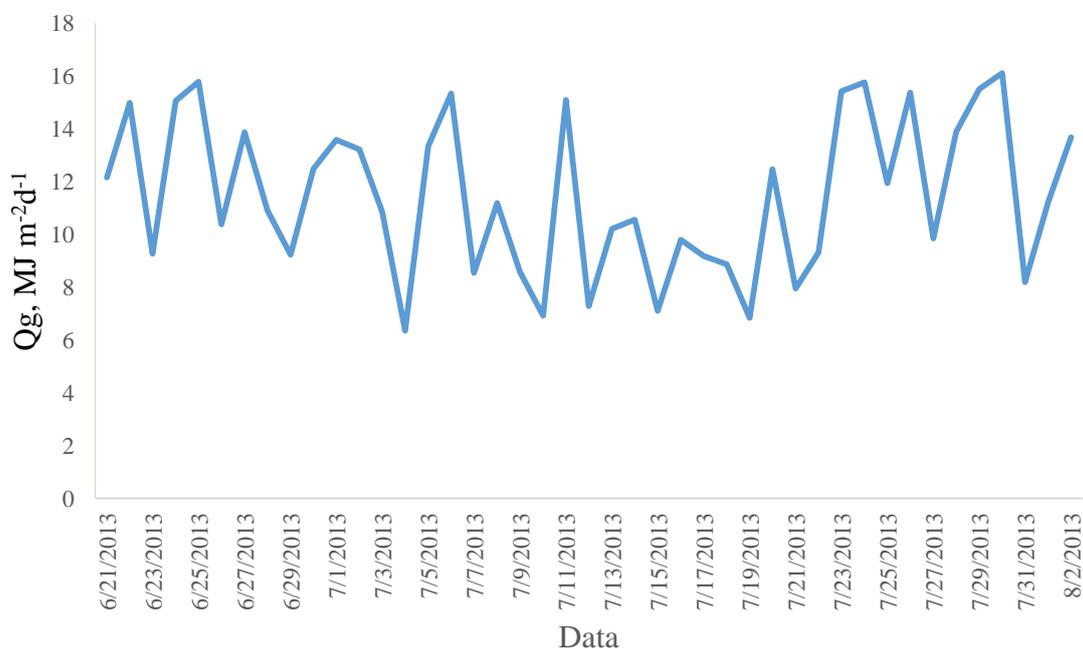


Figura 8: Variação média diária da radiação solar global ( $Q_g$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) no ambiente externo ( $Q_g$  externa), no período de 21/06 a 05/07/2013, Recife, PE.

A cobertura plástica do ambiente protegido promoveu atenuação da  $Q_g$  externa para o interior do ambiente, pode-se observar na Figura 9 que a distribuição da radiação sofreu variações entre  $700$  e  $200 \text{ W m}^{-2}$ , principalmente depois das 9h:30min da manhã, o que pode ser explicado pelas condições atmosféricas, devido a presença de nuvens decorrente á estação chuvosa no Recife (clima  $As'$ ), durante o período do monitoramento experimental.

Essa variação na distribuição da  $Q_g$  afeta principalmente a transmitância da  $Q_g$  e conseqüentemente a transmitância do material de cobertura do ambiente

protegido. Para esse dia de maior disponibilidade da  $Q_g$  foi encontrado o valor de 75,7%, superior a encontrada durante o período do monitoramento experimental, que foi de 71%. Wang, Luo e Li (2013), encontraram uma transmitância em torno de 70%, para a cobertura plástica utilizada, já Al-Helal e Alhamdan (2009) com um experimento durante o período do inverno, na arábia saudita, observaram valores de 80% da transmitância da  $Q_g$ .

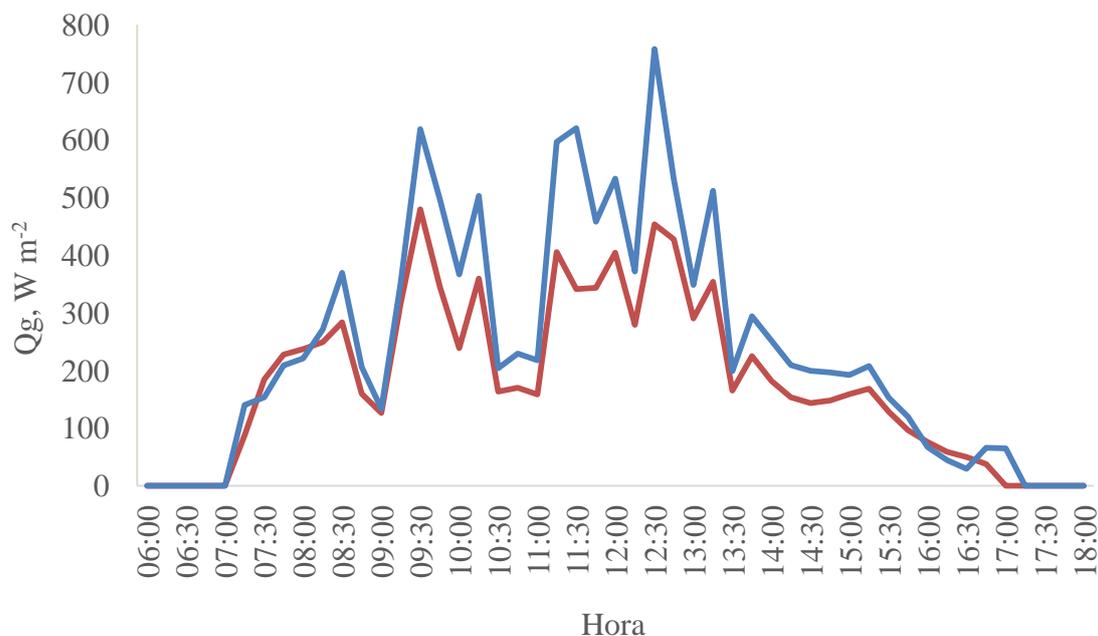


Figura 9: Variação a cada 15 min durante as horas do dia da  $Q_g$  (W m<sup>-2</sup>) externa e internamente do ambiente protegido no dia com maior disponibilidade de  $Q_g$  (25/06/2013), Recife, PE.

Na Figura 10, nota-se a relação entre a  $Q_g$  registrada no ambiente protegido e externo, para o dia simulado (25/06/2013), em que se verifica que os valores do eixo das ordenadas apresentam o coeficiente linear de 0,72 em relação aos valores do eixo das abscissas, ou seja, os valores da  $Q_g$  interna são 72,5% das observadas externamente, o que representa um valor próximo da transmitância da  $Q_g$  média encontrado por Lucena (2014), para o período todo (71%).

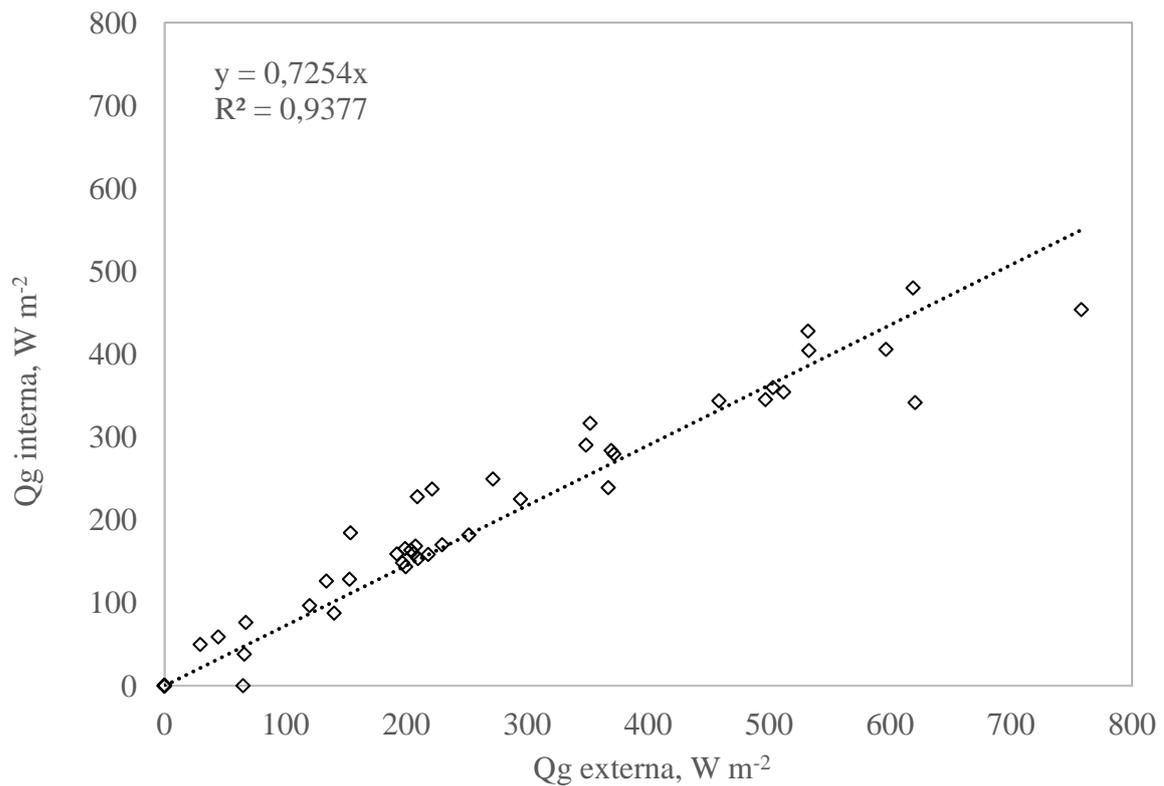


Figura 10: Relação entre a  $Q_g$  ( $W m^{-2}$ ) durante o período entre 6h até 18h no ambiente protegido e no ambiente externo em  $W m^{-2}$ , na escala de 15 minutos do dia simulado 25/06/2013, Recife, PE.

Durante o período do monitoramento das variáveis meteorológicas, em média, a  $T_{ar}$  interna do ambiente protegido foi superior aos observados externamente, com valores de 25,8 e 25,1 °C respectivamente, o que resultou numa diferença média entre os dois ambientes de 0,7 °C, durante os 43 dias de monitoramento. A diferença da  $T_{ar}$  durante os horários das 6 até às 18h do dia simulado foi em média de 0,63 °C (Figura 11). Essa diferença entre os valores da  $T_{ar}$  interna quando comparado a externa ( $\Delta T_{ar}$ , °C) apresenta variação de acordo com a época do ano, clima da região, arquitetura do ambiente protegido, tipo de cobertura, tipo de fechamento lateral, manejo de irrigação, manejo das aberturas para ventilação e vegetação do em torno (GUISELINI et al., 2013).

A UR no interior do ambiente protegido foi maior que os valores observados externamente, em média, durante todo o experimento, da ordem de 81 e 79%, respectivamente (LUCENA, 2014). Observa-se, ainda, na Figura 11 a variação da umidade relativa do ar entre os horários das 6 até às 18h do dia simulado, nas

horas iniciais da manhã e no final da tarde os valores internos da UR foram maiores do que os registrados externamente, porém quando a Tar começa a se elevar, após as 9h da manhã, a UR encontra seus valores mais baixos, por se tratar de variáveis inversamente proporcionais. Em suma, durante esse dia o valor médio da umidade relativa do ar apresentou também a mesma tendência da observada durante todo o monitoramento experimental, com valor médio de 86,1% no ambiente protegido e 83,7% no ambiente externo. Segundo Matínez e Lira (2008) a Tar e UR mantem uma relação direta com a pressão de vapor d'água, o que explica que o aumento da Tar resultará no aumento da pressão de vapor d'água.

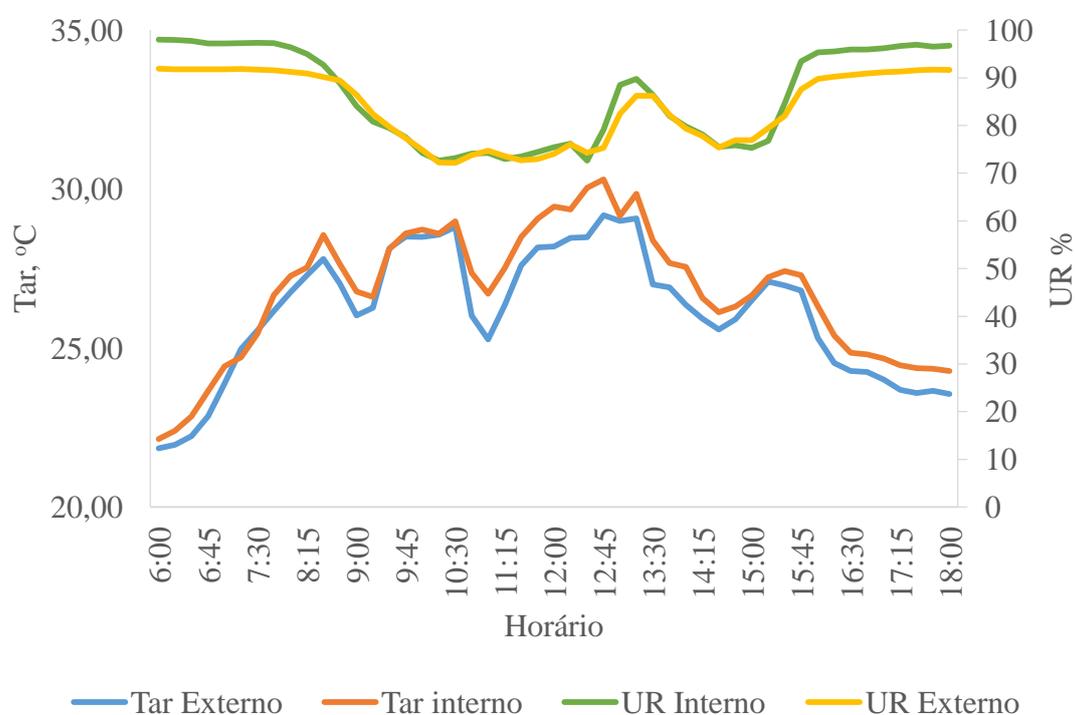


Figura 11: Variação da temperatura do ar (Tar) e da umidade relativa do ar (UR) horário diurnos entre as 6 até 18h no ambiente protegido e no ambiente externo em °C e % respectivamente, na escala de 15 minutos do dia simulado, Recife, PE.

## 5.2. Validação das Simulações do Ambiente Protegido

A Figura 12 mostra a geometria da malha computacional gerada com ortogonalidade em que nesse estudo o valor obtido foi de 0,74, considerada boa segundo Fluent (1998) que classifica valores de 0 a 1 para ortogonalidade, sendo quanto mais próximo de zero menor a qualidade da malha. A malha gerada foi

considerada como semi-estruturada, pois apresentaram elementos paralelos e também elementos desformes, no total a malha foi composta por 37.533 nós e 36.176 elementos, em que cada elemento representou 10 cm<sup>2</sup> dos 350 m<sup>2</sup> do total da malha. E das 2000 mil interações programadas a maioria das simulações convergiram entre 250 e 300 interações, com tempo médio de processamento de 5 min para cada processo. Bouhoun-Ali et al. (2014) testou variadas quantidades de elementos da malha computacional e observaram para um ambiente protegido de 5,9 m de altura por 9,6 m de largura, que 36900 elementos garantiram resultados satisfatórios, assim como no presente estudo.

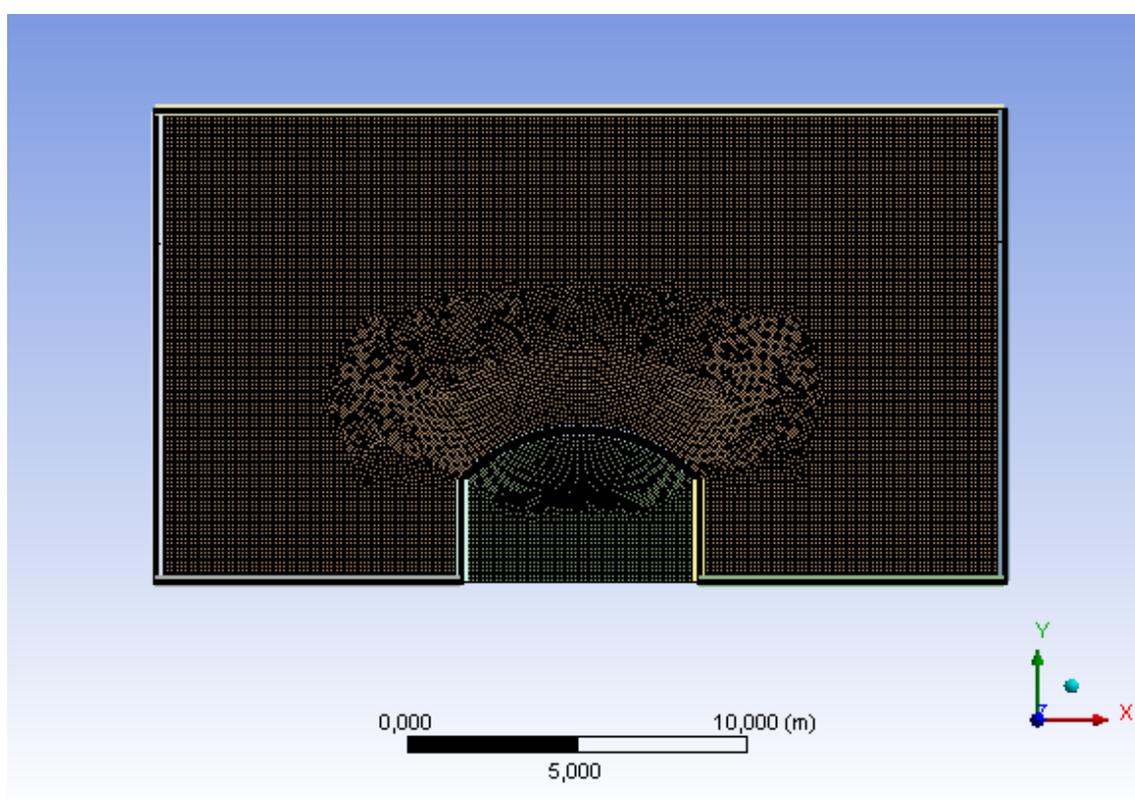


Figura 12: Representação do ambiente protegido e o seu entorno (camada atmosférica limite), por meio da malha computacional semi-estruturada para geração dos modelos CFD, Recife, PE.

Os valores das condições de contorno de cada horário, do dia simulado, foram usados para a validação dos resultados das simulações em CFD do ambiente protegido (Tabela 4).

Tabela 4: Valores das variáveis iniciais usadas nas condições contorno para cada simulação:

<b>Hora</b>	<b>9h30</b>	<b>10h</b>	<b>11h30</b>	<b>12h30</b>	<b>13h</b>	<b>13h15</b>	<b>14h</b>
<b>Qg (W m<sup>-2</sup>)</b>	619	367	621	758	532	512	252
<b>Tar (°C)</b>	28,13	28,50	27,60	28,49	29,00	29,08	26,36
<b>UR (adm)</b>	0,80	0,72	0,73	0,74	0,82	0,86	0,79
<b>Vv (m s<sup>-1</sup>)</b>	1,43	1,049	1,478	1,147	1,65	1,634	1,906

Nota-se na Figura 13 a variação vertical da Qg, em W m<sup>-2</sup>, simulada em todos esses horários citados anteriormente (Tabela 4). Em todos os casos, há uma variação na intensidade e distribuição da Qg, ao longo do perfil vertical do ambiente protegido. Baxevanou et al., (2010), também verificaram tais resultados, em suas em suas simulações, variações acima de 200 W m<sup>-2</sup> foram constatadas, salientam, ainda, que essa variação pode ser atribuída as condições do ar no interior do ambiente protegido, como o teor de água presente, que altera propriedades de absorção e refração do ar, conseqüentemente interfere na transferência da energia solar para o interior do ambiente protegido.

Ao analisar o perfil da distribuição da Qg incidente no ambiente protegido, observa-se uma uniformidade da energia incidente ao longo da largura do ambiente protegido nos horários estudados. Fidaros et al. (2010) afirmam que conhecer a distribuição da Qg no interior do ambiente protegido ajuda no manejo do posicionamento da plantas, no interior do ambiente, assim elas podem melhor absorver essa energia para o processo de fotossíntese.

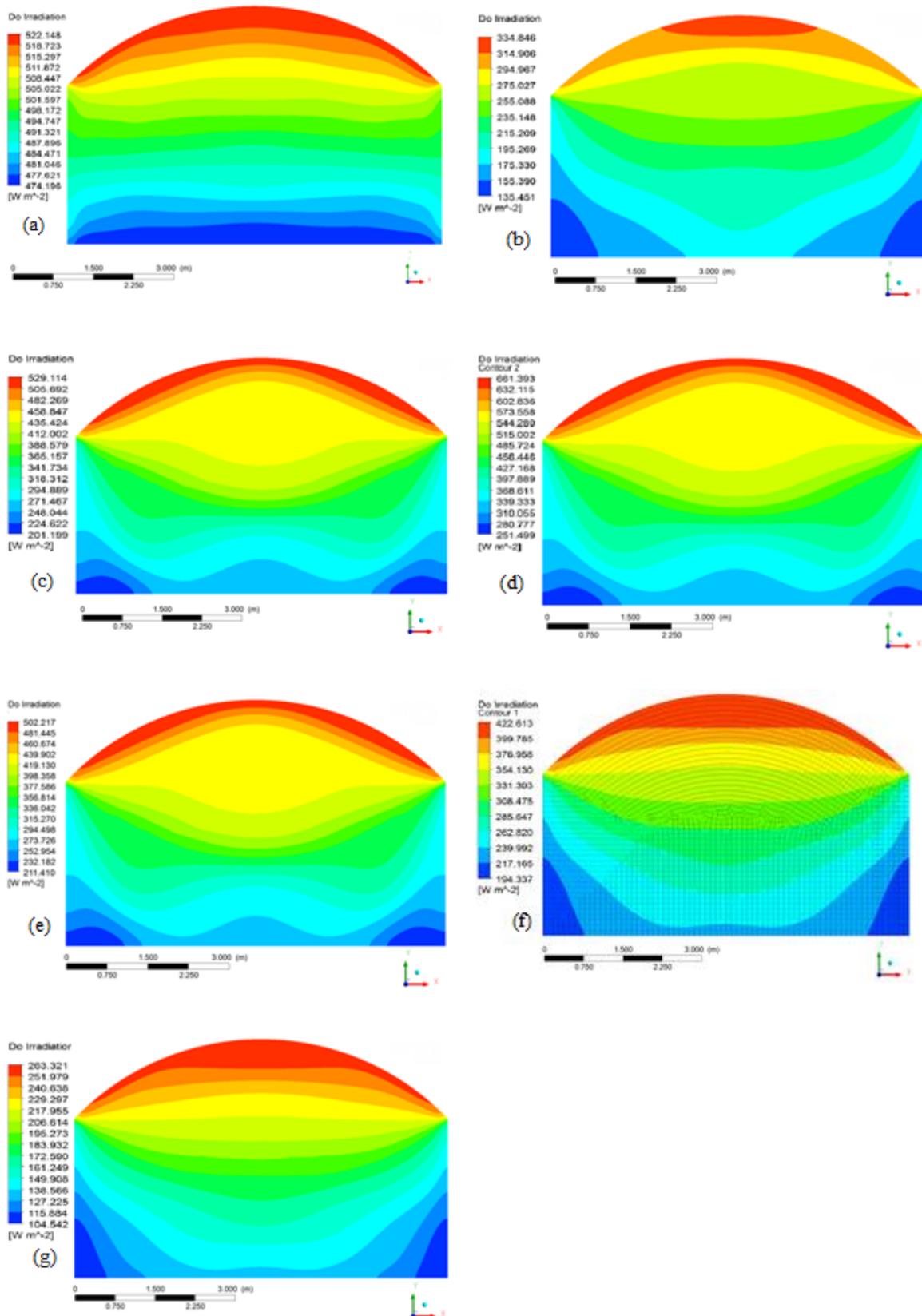


Figura 13: Distribuição da  $Q_g$  em  $W m^{-2}$ , obtidas pela simulação CFD (a-g): a) 9h30min b)10h c)11h30min d)12h30 e)13h; f)13h15min e g)14h, do dia.

A Figura 14 demonstra a relação entre a  $Q_g$  medida no interior do ambiente protegido com os valores obtidos em cada simulação numérica por meio da dinâmica de fluidos computacional nos horários do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h). Nota-se que o coeficiente de determinação foi elevado ( $R^2=0,98$ ) o que indica boa associação linear. O coeficiente angular foi de 0,97, ou seja, as simulações apresentam um erro médio de 3% dos valores obtidos pela estação meteorológica no interior do ambiente protegido.

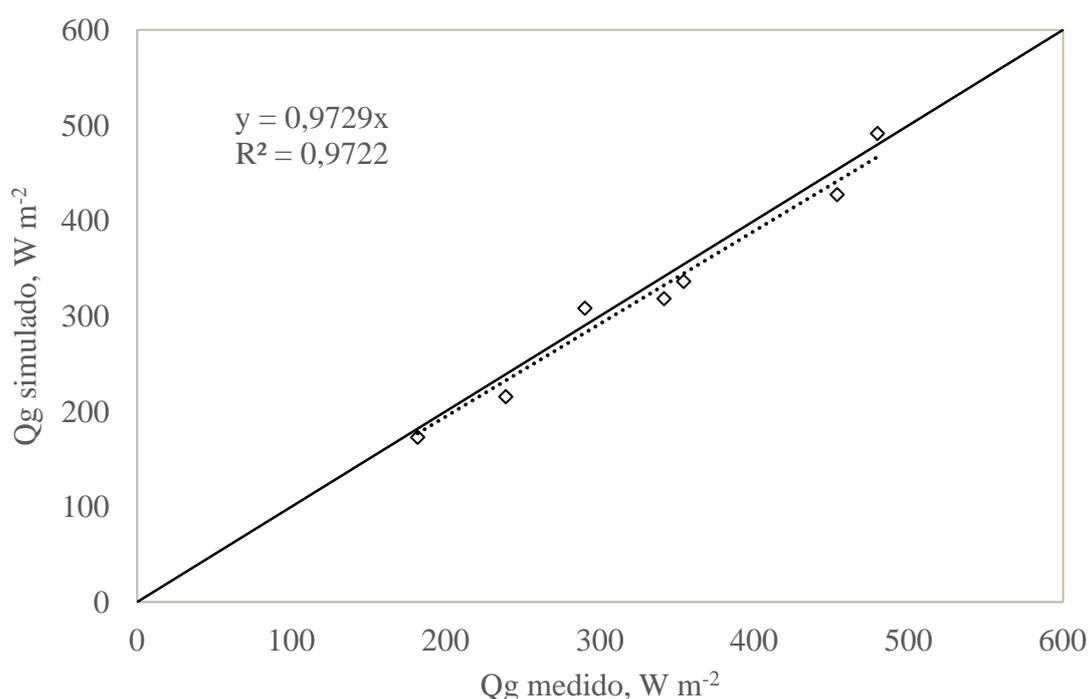


Figura 14: Relação entre a  $Q_g$  global obtida no monitoramento experimental e das simulações numéricas por meio da dinâmica de fluidos computacional nos diferentes horários simulados do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h).

Quanto a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ,  $^{\circ}C$ ), observa-se na Figura 13 as distribuições das  $T_{ar}$  simuladas numericamente em CFD no perfil vertical do ambiente protegido. A influência dos mecanismos de transferência de calor segundo Chow e Holdø (2010) e Baxevanou et al., (2010) influenciam a temperatura do ambiente protegido, uma vez que a convecção forçada (advecção) atua principalmente nas malhas laterais e no solo, onde o vento incide, e os processos de

condução e irradiação, atuam a partir da cobertura plástica do ambiente protegido e dos materiais presente no interior.

É perceptível, que no centro do ambiente protegido a Tar são mais constante do que próximo da cobertura, onde existe uma maior influência da  $Q_g$  que incide diretamente na cobertura plástica (condução), enquanto na parte inferior os contornos apresentam variações próximas das malhas laterais, onde processos de convecção e advecção são mais atuantes. Em média uma diferença entre a Tar próxima da cobertura em relação à Tar próxima do solo foi de  $1,2^{\circ}\text{C}$ . Segundo Baxevanou et al., (2010), a temperatura do ar na parte superior do ambiente protegido, é função da incidência da radiação e seu ângulo, já na parte inferior, a temperatura do ar é totalmente independente do ângulo de incidência da  $Q_g$  e dependente dos processos de convecção e advecção.

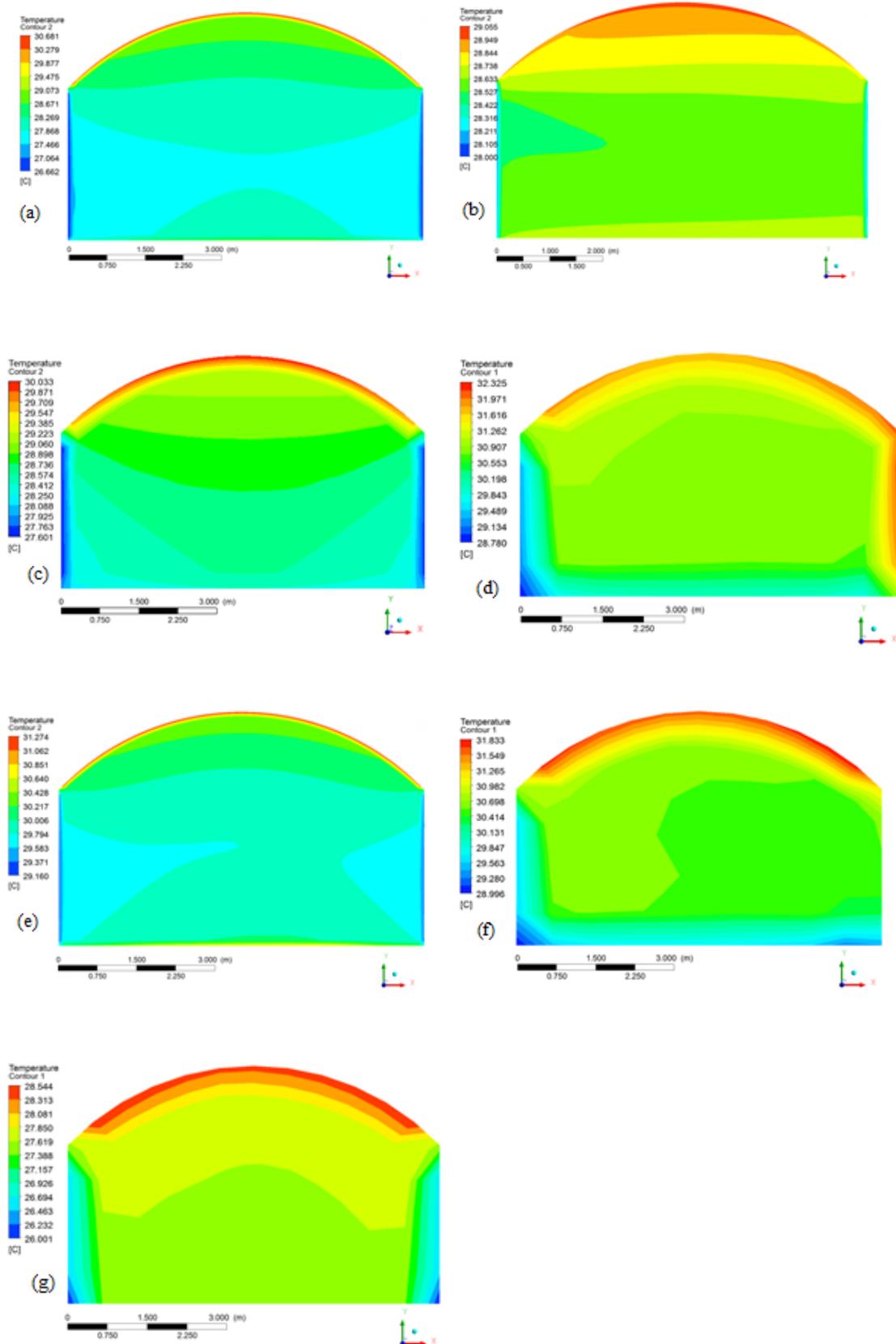


Figura 16: Distribuição da Tar em °C obtidas pela simulação CFD (a-g): a) 9h30min b)10h c)11h30min d)12h30 e)13h; f)13h15min e g)14h, do dia simulado.

Nota-se na Figura 17 a relação entre a Tar medida no interior do ambiente protegido com os valores obtidos em cada simulação numérica por meio da dinâmica de fluidos computacional nos horários do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h). Observa-se que o coeficiente de determinação foi elevado ( $R^2=0,93$ ) o que indica boa associação linear. O coeficiente angular foi de 1,01, ou seja, as simulações apresentam um erro menor que 1% dos valores obtidos pela estação meteorológica no interior do ambiente protegido.

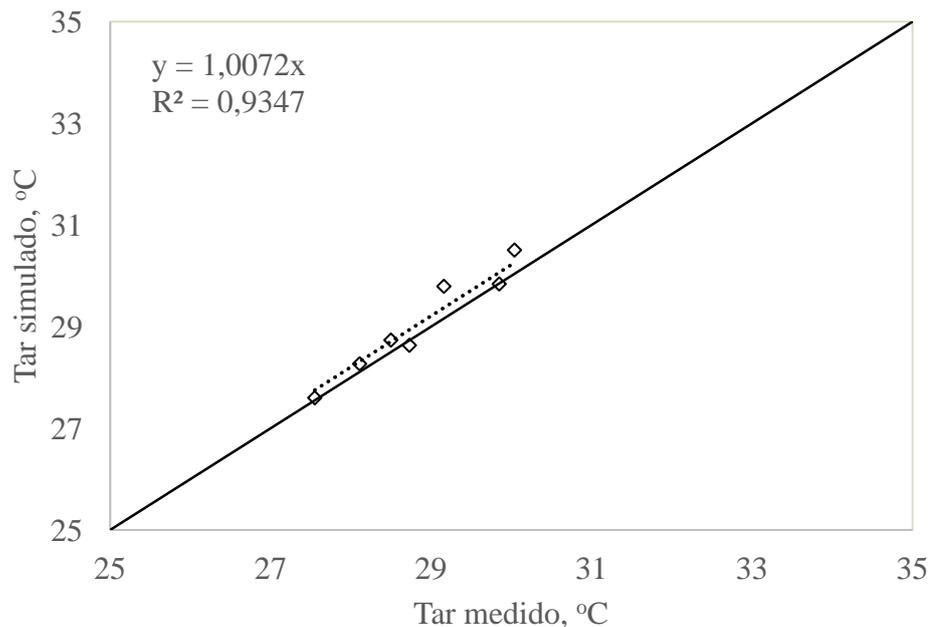


Figura 17: Relação entre a Tar obtida no monitoramento experimental e das simulações numéricas por meio da dinâmica de fluidos computacional nos diferentes horários do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h).

Cabe ressaltar que as diferenças entre Tar medidas e Tar simuladas nos horários estudados tiveram diferenças entre 0,1 até 0,63 °C, com média de 0,21 °C. Quando comparados os valores de Tar simulado aos de Tar externo, as diferenças calculadas foram entre 0,13 até 2,02 °C, com média de 0,89 °C, superior ao encontrado na Figura 11, quando comparado a Tar medida e externa (0,63 °C). Fato que pode ser explicado pela ausência de entrada de parâmetros mais detalhados referentes a relação solo planta atmosfera. Segundo Burnet and Boulard (2010) a heterogeneidade espacial das variáveis micrometeorológicas no interior do ambiente protegido interfere, consideravelmente, nas atividades das culturas, trocas gasosas da

planta, particularmente transpiração e fotossíntese. Tais processos, por sua vez, também, podem alterar as trocas de calor sensível e latente.

A Figura 19 apresenta as distribuições da UR simulado numericamente em CFD no perfil vertical do ambiente protegido. A UR apresenta maiores valores nas regiões laterais, nas partes inferiores e a partir do centro, até o topo da estrutura os valores diminuem, esta distribuição se deve ao movimento do fluxo de ar no interior do ambiente (Kittas e Bartazanas, 2007),. Molina-Aiz et al (2004) detalha melhor, ao observar em suas simulações em CFD, que para  $V_v$  inferior a  $1,8 \text{ m s}^{-1}$  o efeito termo-sifão (convecção) é mais atuante do que as forças dinâmicas do vento (advecção), onde o ar quente, menos denso e com menor quantidade de vapor de água ocupa as camadas superiores do ambiente protegido.

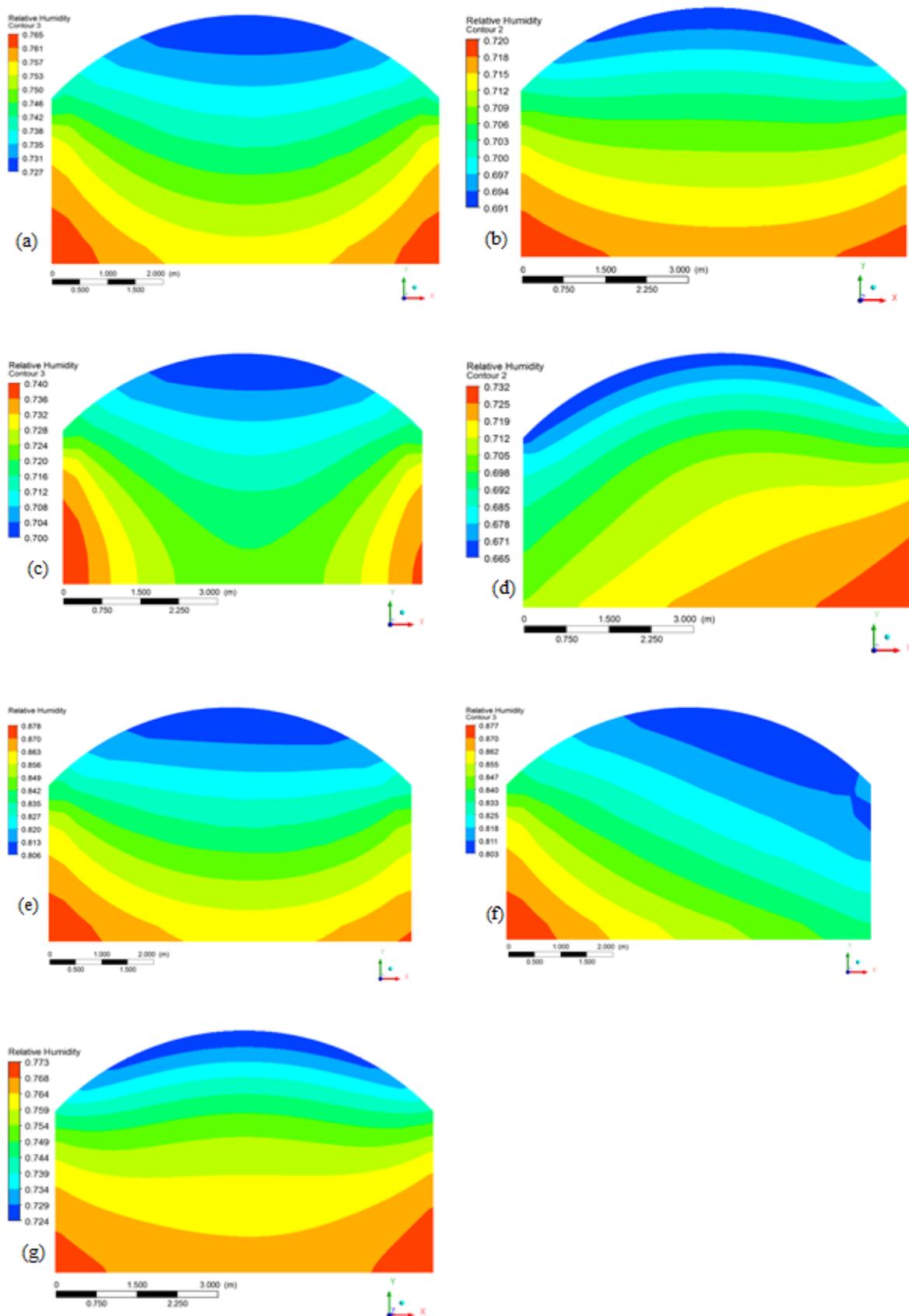


Figura 19: Distribuição da UR obtidas pela simulação CFD (a-g): a) 9h30min b)10h c)11h30min d)12h30 e)13h; f)13h15min e g)14h, do dia simulado.

As relações entre as UR monitoradas no interior do ambiente protegido com as simuladas em CFD nos horários estudados (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h) do dia simulado (Figura 20), apresentaram boa concordância entre os valores comparados ( $R^2=0,94$ ), onde os resultados simulados representaram em média 97% dos obtidos no monitoramento experimental e próximo do coeficiente angular ( $y= 0,9645x$ ) da relação entre as duas medidas (Figura 20). Observa-se também que os resultados das simulações são menores quando comparados aos resultados medidos no interior do ambiente, fato que pode ser explicado pela superestimação dos valores encontrados de Tar simulado (Figura 17).

Kim et al., (2008) mencionam que modelos em 2D podem apresentar dificuldade na simulação da UR, geralmente subestimando-os, a razão disso reside na instabilidade do movimento do vapor-de-água, que apresenta um movimento espacial variável, cabe ressaltar que geometrias 3D apresentam melhores resultados.

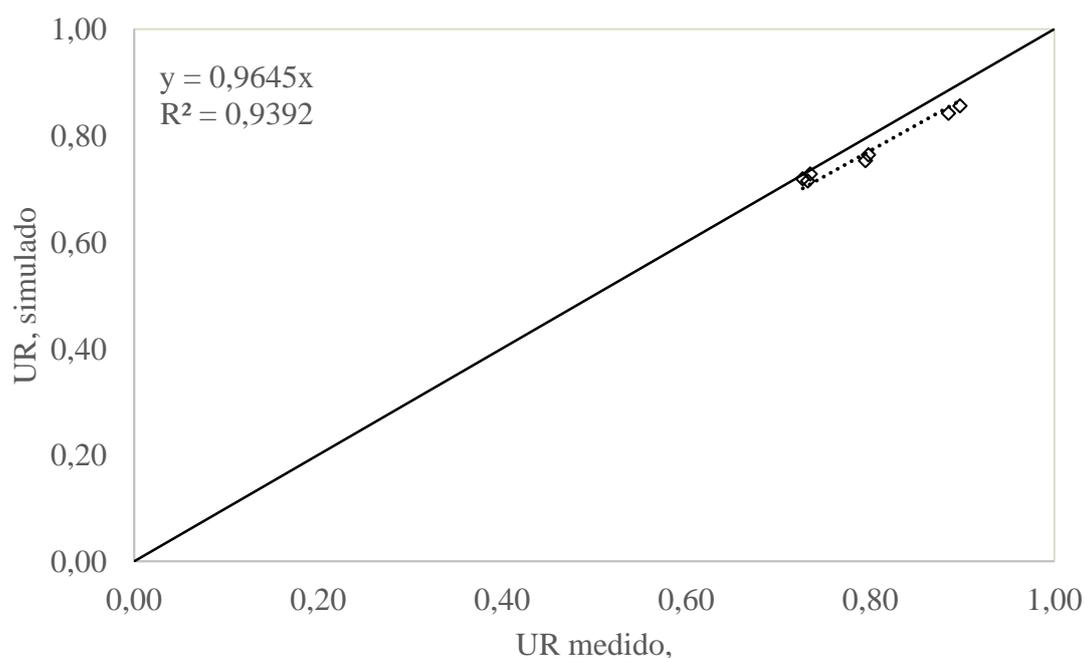


Figura 20: Relação entre a UR obtida no monitoramento experimental e das simulações numéricas por meio da dinâmica de fluidos computacional nos diferentes horários do dia simulado (9h30min; 10h; 11h30min; 12h30; 13h; 13h15min e 14h

### 5.3. Simulação e Comparação dos Sistemas de Ventilação

A Figura 21 mostra os vetores da  $V_v$  simulados e suas distribuições no perfil do ambiente protegido. O sistema de ventilação natural com a abertura no teto do ambiente protegido (Figura 21 a1 e a2) apresenta um fluxo de ar ascendente em direção à abertura, essa característica foi causada por ter sido configurada como uma saída de fluxo de ar (outflow) e a lateral direita da camada limite atmosférica foi configurada com a pressão atmosférica (pressure-outlet).

Considera-se ascensão do fluxo de ar no sistema de ventilação natural pela condição inicial, onde a  $T_{ar}$  interna no horário simulado é maior que a externa, então, por diferença de temperatura, causam mais diferenças de pressão entre os dois ambientes, com o fluxo de ar aumentando em direção à abertura, pela atuação do efeito termo-sifão. Kastoulas et al. (2006) e Boulard et al. (1997), salientam que esses padrões de fluxo do ar podem ser diferentes com a presença da cultura, em que os autores exemplificam com a cultura do tomateiro tutorado, em que o tamanho e arranjo do cultivo modificou essas características do fluxo do ar.

No presente estudo a taxa de ventilação máxima calculada pelo *software* foi de  $3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , Kastoulas et al (2006) simulando telas anti afidicas e vários designs de aberturas para promover a ventilação natural em ambiente protegido encontrou valores variando em até  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para sistemas com abertura lateral, segundo Albright (1990) baixas taxas de ventilação podem ser creditada a variações entre o ar interno e externo, onde o ideal para promover uma ventilação suficiente é de 75% da taxa de ventilação máxima para uma troca de ar por minuto.

A distribuição dos vetores na simulação do sistema pelo permutador de calor através do solo (PCAS) (Figuras 21 b1 e b2), nota-se que o fluxo é ascendente da entrada de ar (tubo lado direito) até a metade do ambiente protegido, posteriormente descendente em direção à saída de ar (tubo lado esquerdo). Cabe ressaltar que a velocidade de entrada do ar foi de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$ .

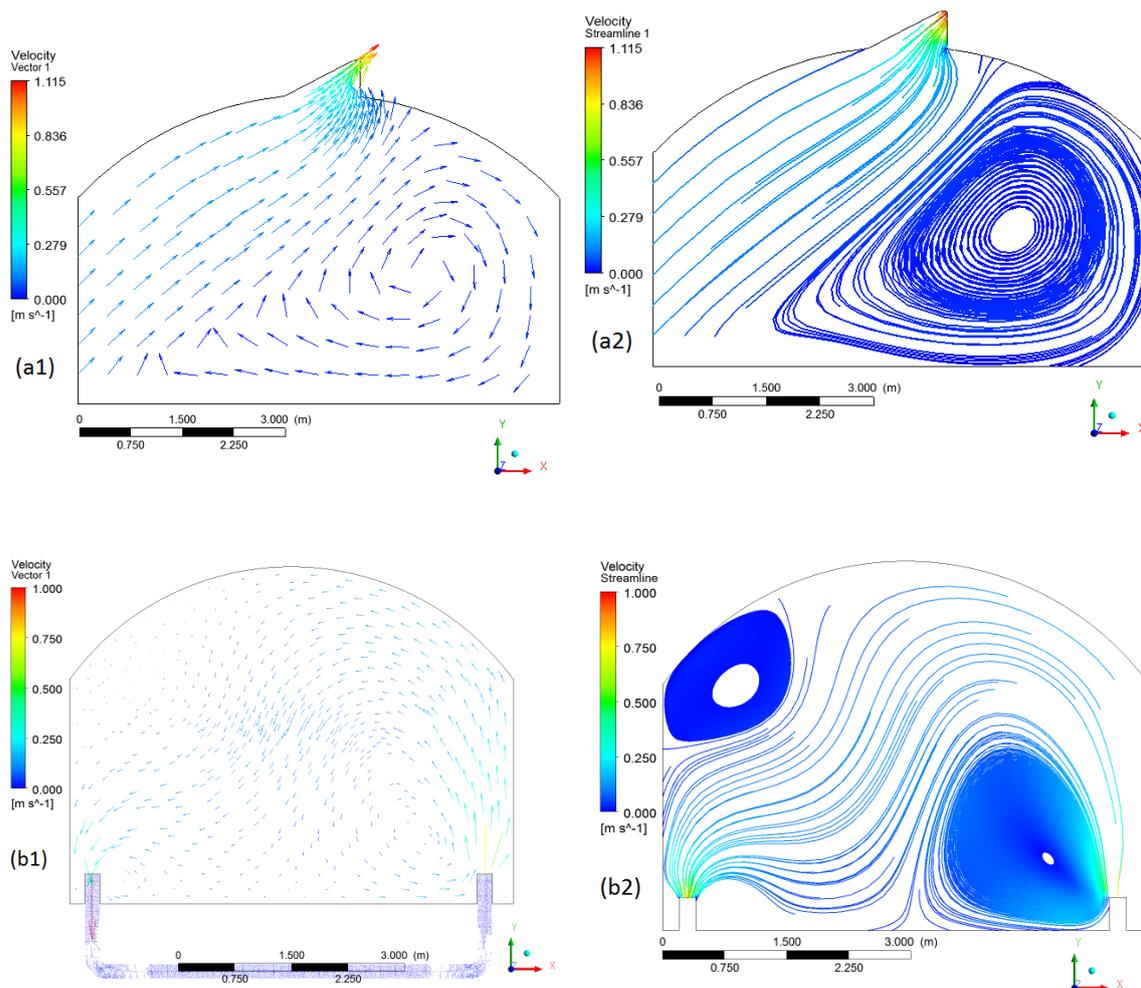


Figura 21: Vetores indicadores da Velocidade do vento ( $V_v, 1$ ) e distribuição do fluxo (2) nos dois tipos de sistemas de ventilação simulados em CFD, (a) sistema de ventilação natural e (b) PCAS do dia simulado.

No sistema com abertura na cobertura do ambiente protegido houve redução  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  no valor da Tar registrada internamente, dessa forma a Tar simulada no interior do ambiente foi igual a Tar registrada na estação meteorológica externa (Figura 22 a).

Nota-se na Figura 22b que no sistema PCAS a diferença entre a Tar registrada internamente e o simulado foi de  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tal fato pode ser atribuído, principalmente, pela baixa condução de calor do solo. Mathur et al (2015) relata que esses sistemas proporcionam um efeito de arrefecimento para o interior do ambiente protegido, onde a temperatura do solo, por estar mais baixa do que a do ambiente, durante um período do dia, devido da condutividade térmica, resfria a tubulação e consequentemente o ar que passa pelos tubos enterrados, porém os autores advertem

para o uso contínuo desse sistema, pois pode ocasionar saturação térmica no solo com o passar do dia, (condutividade térmica), uma vez que o solo acumula calor e a dissipação é lenta.

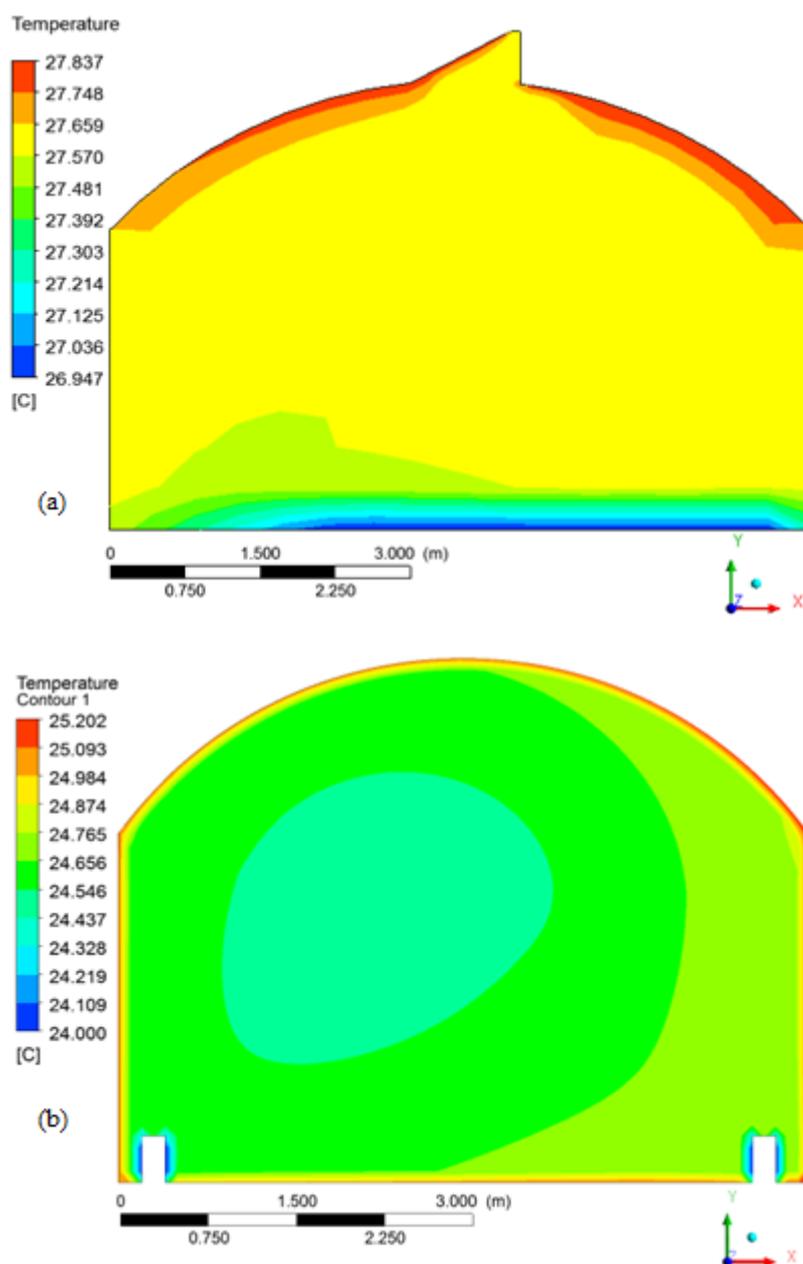


Figura 22: Distribuição da Tar no perfil vertical do ambiente protegido nos dois tipos de sistemas de ventilação simulados em CFD, (a) Sistema de ventilação natural e (b) PCAS, do horário simulado.

A distribuição da umidade UR simulada por meio CFD dos dois sistemas de ventilação modelados (Figura 23), observa-se que para simulação do sistema de ventilação natural, foi observada um equilíbrio da UR simulada com a UR externa sem grandes mudanças (Figura 23a). A abertura na cobertura favoreceu o processo de

convecção do ar, efeito termo sifão, dessa forma como a renovação da massa de ar úmida a UR no interior do ambiente pode se igualar a registrada externamente (Vázquez, 2013).

O sistema PCAS conseguiu desumidificar 15% em relação à UR registrada (Figura 23b), logo na entrada de ar (lado direito) a UR simulada foi de 0,23; a massa de ar nova foi misturada com a presente no interior do ambiente, assim o valor da UR simulada foi alterada gradativamente, devido a presença de vapor de água no interior do ambiente, até que, na saída de ar a UR simulada, foi a máxima (0,77), ainda assim valor inferior a UR registrado (81%) por Lucena (2014).

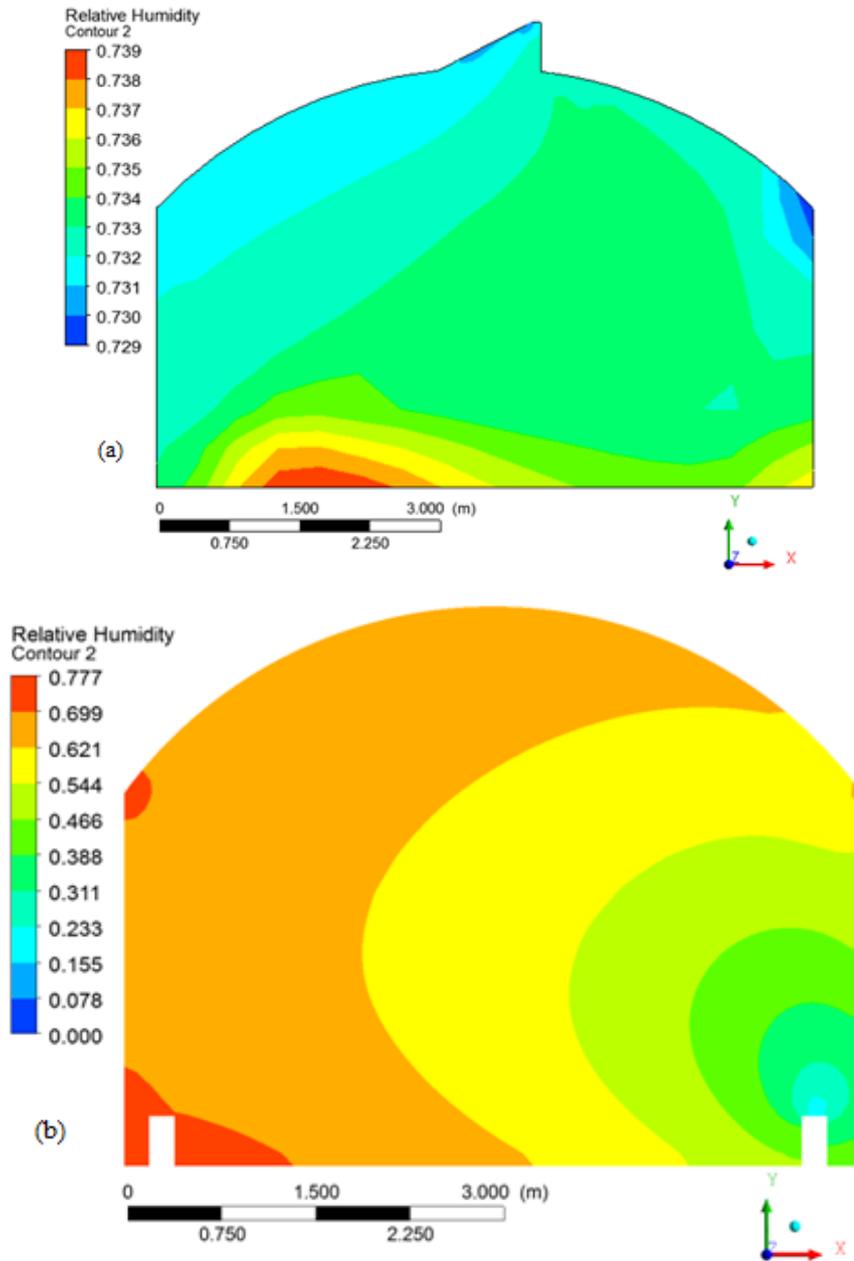


Figura 23: Distribuição da UR no perfil vertical do ambiente protegido nos dois tipos de sistemas de ventilação simulados em CFD, (a) sistema de ventilação natural e (b) PACS, do horário simulado.

## 6. CONCLUSÕES

O monitoramento experimental, para a validação dos resultados, foi fundamental nesse estudo, apesar da corrente evolução dos softwares de CFD e o crescente poder de processamento dos computadores, a análise em campo ainda se faz fundamental para não subestimar ou superestimar uma variável micrometeorológica.

Com o uso da dinâmica de fluidos computacional foi possível simular com precisão os perfis das principais variáveis micrometeorológicas ( $Q_g$ , Tar, UR), e assim descrever as variações simuladas do fluxo de ar em todo o interior do ambiente protegido estudado.

Os softwares CFD como ferramenta de projeto para a simulação dos dois sistemas de ventilação atendeu ao esperado, gerou resultados que podem servir para novos designs dos ambientes protegidos e avaliação.

A modelagem do sistema PCAS obteve os menores valores de Tar simulada e UR simulada quando comparadas aos valores obtidos pelo sistema natural de ventilação.

## 7. REFERÊNCIAS

ALBRIGHT, L. D. Environmental Control for Animals and Plants. American Society of Agricultural Engineers. St Joseph, MI. 1990.

AL-HELAL I. M.; ALHAMDAN A. M.; Effect of arid environment on radiative properties of greenhouse polyethylene cover, Solar Energy, Volume 83, n.6, p790-798, ISSN 0038-092X, 2009

<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.11.008>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08003174>)

AMBAW A., DELELE M.A., DEFRAEYE T., HO Q.T., OPARA L.U., NICOLAÏ B.M., VERBOVEN P. The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: Past, present and future Computers and Electronics in Agriculture, Volume 93, April 2013, Pages 184–194  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.05.009>

ANDRIOLO, J.L. Fisiologia das culturas protegidas. Santa Maria: UFSM, 142 p.1999.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; DAMASCENO, L. M. O. ; DIAS, N. S.; GHEYI, H. R.; GUISELINI, C. Climate variations in greenhouse cultivated with gerbera and relationship with external conditions. Engenharia Agrícola, v. 31, p. 857-867, 2011.

ASSIS, R. L. Desenvolvimento rural sustentável no Brasil: perspectivas a partir da integração de ações públicas e privadas com base na agroecologia. Economia Aplicada, v.10, n.1, p.75-89, 2006.

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-80502006000100005&lng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502006000100005&lng=en)

BAIO, F.H.R.; ANTUNIASSI, U.R.; BALASTREIRE, L.A.; CAIXETA FILHO, J.V. Modelo de programação linear para seleção de pulverizadores agrícolas de barras. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.2, p.355-363, 2004.

BAIO, F.H.R.; ANDREW D. RODRIGUES; GILSON S. DOS SANTOS; SIMONE P. DA SILVA Modelagem matemática para seleção de conjuntos mecanizados agrícolas pelo menor custo operacional Eng. Agríc. vol.33 no.2 Jaboticabal Mar./Apr. 2013

BANSAL V., MISRA R., AGRAWAL G.D., MATHUR J. Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling Energy and Building, v.42, pp. 645–648, 2010.

BAXEVANOU C. FIDAROS D.; BARTZANAS T.; KITTAS C.. Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, Vol 12, No 3-4 (2010)

<http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1643>

BECKMANN, M.Z.; DUARTE, R.B.; PAULA. V. A.; MENDEZ, M. E. G., PEIL, R.M.N. Qg em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.1, p.86-92, jan-fev, 2006.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000100013>.

BJERG B., SVIDT K., ZHANG G., MORSING S., JOHNSEN J.O. Modelling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal house. Computers and Electronics in Agriculture; v34: p223–35,2002.

BOUHOUN-ALI H.; BOURNET P. E.; DANJOU V.; MORILLE B.; MIGEON C.. CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties, Biosystems Engineering, Volume 127, November 2014, Pages 159-175, ISSN 1537-5110, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511014001500>)

BOULARD. T.; WANG S. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in plastic tunnel *Comput. Electron. Agric.*, v34, pp. 173–190 2002.

BOURNET P. E.; BOULARD T.. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 74, Issue 2, p.195-217, 2010.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910001511>)

BURIOL, G.A.; STRECK, N.A.; PETRY, C. Transmissividade à Qg do polietileno da baixa densidade utilizado em estufas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.25, n 1, p.1-4, 1993.

BURIOL, G. A.; LAGO, I.; HELDWEIN, A. B.; SCHNEIDER, F. M.; ANDRIOLO, G. L. Disponibilidade de Qg para hortaliças cultivadas em ambiente protegido no período invernal no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.13, n.1, p.21-26, 2005.

BURIOL, G.A.; RIGHI, E.Z.; SCHNEIDER, F.M.; STRECK, N.A.; HELDWEIN, A.B.; ESTEFANEL, V. Modificação da UR pelo uso e manejo da estufa plástica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.8, p.11-18, 2007.

CARDOSO, L.S.; BERGAMASCHI, H.; COMIRAM, F.; CHAVARRIA, G.; MARODIN, G.A.B.; DALMAGO, G.A.; SANTOS, H.P. dos; MANDELLI, F. Alterações micrometeorológicas em vinhedos pelo uso de coberturas de plástico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.441-447, 2008.

CARVALHO, C. M.; LACERDA, C. F.; VIEIRA, M. R.; RODRIGUES, C. F.; AMÉRICO, J. G.; NEVES, A. L. R. Comportamento ecofisiológico das culturas de milho e feijão-de-corda sob diferentes condições de cultivo. *Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia*, v2, n2, Maio- Agosto. 2009.

CERMEÑO, Z.S. Cultivo de plantas hortícolas em estufa. Litexa-Portugal: Lisboa, 1993. 366p.

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H.P. dos; SÔNEGO, O.R.; MARODIN, G.A.B.; BERGAMASCHI, H.; CARDOSO, L.S. Incidência de doenças e necessidade de controle em cultivo protegido de videira. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.29, p.477-482, 2007.

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P.; FELIPPETO, J.; MARODIN, G. A. B.; BERGAMASCHI, H.; CARDOSO, L. S.; FIALHO, F. B. Relações hídricas e trocas gasosas em vinhedo sob cobertura plástica. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.30, p. 1022-1029, 2008.

CHESF. Fontes Energéticas Brasileiras Inventário/ Tecnologia - Energia Solar, Recife/PE, DEG/DETE, 1987

COELHO, M. BAPTISTA, F., FITA DA CRUZ, V., GARCIA J.L. Comparison of four Natural Ventilation systems in a mediterranean Greenhouse. *Acta Hort.* 729 p157-171 2006

COMSTOCK, J; EHLERINGER, J. Stomatal response to humidity in common bean: implication for maximum transpiration rate, water-use efficiently and productivity *Australian Journal of Plant Physiology*, v20 n.6, pp. 669–691, 1993

CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Efeito do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.735- 743, 2002.

DALMAGO, G.A.; HELDWEIN, A.B.; NIED, A.H.; GRIMM, E.L.; PIVETTA, C.R. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da  $Q_g$ , da temperatura, da umidade relativa e do deficit de saturação do ar. *Ciência Rural*, v.36, p.785-792, 2006.

DELELE M.A., VERBOVEN P., HO Q.T., NICOLAÏ B.M. Advances in mathematical modelling of postharvest refrigeration processes *Stewart Postharvest Review*, v2, p. 1, 2010

DUARTE, L. A.; SCHÖFFEL, E. R.; MENDEZ, M. E. G.; SCHALLENBERGER, E. Alterações na Tar mediante telas nas laterais de ambientes protegidos cultivados com tomateiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.2, p.148–153, 2011.

FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S.R.; BERLATO, M.A. Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a Qg. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.1, p.31-36, 1993a.

FARIAS, J.R.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, M.A.B.; OLIVEIRA, A. C. B. Alterações na temperatura e UR provocadas pelo uso de estufa plástica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 51-62, 1993b.

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

FIDAROS D.K.; BAXEVANOU C. A.; BARTZANAS T.; KITTAS C.. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day, *Renewable Energy*, Volume 35, n7, P. 1380-1386, ISSN 0960-1481, 2010  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.013>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109004893>)

GIL, R., BOJACÁ, C. R.; SCHREVEN. E.. Suitability evaluation of four methods to estimate leaf wetness duration in a greenhouse rose crop. *Acta Hort.* 893, 797-804, 2011.

GONDIM, A. R. DE O. ; PUIATTI, M.; CECON, P. R.; FINGER, F. L. Crescimento, partição de fotoassimilados e produção de rizomas de taro cultivado sob sombreamento artificial. *Horticultura Brasileira*, v.25, n.3, p.418-428. 2007.

GOTO, R.; HORA, R.C.; DEMANT, L.A.R. Cultivo protegido no Brasil: histórico, perspectivas e problemas enfrentados com sua utilização. In: Bello Filho, F.; SANTOS, H.P.; OLIVEIRA, P.R.D. (Eds.). Seminário de Pesquisa sobre Fruteiras Temperadas. 1ª ed. Bento Gonçalves, Embrapa uva e vinho. p.27-29. 2005.

GUISELINI, C.; SENTELHAS, P. C.; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Temperatura e umidade do ar em ambientes protegidos cobertos com plástico transparente associado à malha termorefletora, instalada externa e internamente. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.15, p.157-162, 2007.

GUISELINI, C.; SENTELHAS, P.C.; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Manejo da cobertura de ambientes protegidos: Qg e seus efeitos na produção da gérbera. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 6, 2010.

GUPTA R., TIWARI G.N., KUMAR A., GUPTA Y. Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD *Energy and Buildings*, 47, pp. 27–34, 2012

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.010>

HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; RADONS, S. Z. ; LOOSE, L. H.; LUCAS, D. D. P.; HINNAH, F. D. Estimativa do saldo de radiação em girassol como função da Qg global. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.16, n.2, p.194–199, 2012.

HEMMING S. Use of natural and artificial light in horticulture – interaction of plant and technology *Acta Horticulturae*, 907, pp. 25–35, 2011.

JACOVIDES, C.P. MIHALAKAKOU, G.. An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purpose *Renewable Energy*, v.6, pp. 893–900, 1995

JEONG W., SEONG J. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods, *International Journal of Mechanical Sciences*, v.78, p.19-26, 2014  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002074031300297X>)

JÚNIOR, J. B. D. e COELHO, F.C. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande. V.12, n.6, p.576–583, 2008.

LEE K.H., STRAND R.K.R.K. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings *Energy and Building*, 40 (2008), pp. 486–494

LUSK C. H., WARTON D. I. Global meta-analysis shows that relationships of leaf mass per area with species shade tolerance depend on leaf habit and ontogeny. *New Phytologist*, v.176, Issue 4, p.764-774, 2007  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2007.02264.x/full>

KATSOULAS N.; BARTZANAS, T.; BOULARD, T.; MERMIER, M.; KITTAS, C.. Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation, *Biosystems Engineering*, Volume 93, Issue 4, p427-436, ISSN 1537-5110, April 2006  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.01.001>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511006000237>)

KATSOULAS, N.; SAVVAS, D.; TSIROGIANNIS, I.; MERKOURIS, O.; KITTAS, C.; Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling, *Scientia Horticulturae*, Volume 123, Issue 1, p90-98, ISSN 0304-4238, 1 December 2009  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2009.08.004>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423809003902>)

KITTAS, C.; KATSOULAS, N.; BAILLE, A.. SE—Structures and Environment: Influence of Greenhouse Ventilation Regime on the Microclimate and Energy

Partitioning of a Rose Canopy during Summer Conditions, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 79, Issue 3, , Pages 349-360, July 2001  
<http://dx.doi.org/10.1006/jaer.2000.0653>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002186340090653X>)

KITTAS, C.; BOULARD, T.; BARTZANAS, T.; KATSOULAS, N.; MERMIER, M.. Influence of an insect screen on greenhouse ventilation. *Transactions of the ASAE*, 45(4), 1083–1090 2002.

KITTAS, C.; BARTZANAS, T.. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 10, , Pages 3774-3784, 2007  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.020>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003155>)

LUCENA A. C. Manejo da radiação solar em ambientes protegidos e seu efeito na aclimatização de mudas micropropagadas de cana-de-açúcar. Dissertação de mestrado de engenharia agrícola, UFRPE, 2014.

MATHUR A.; SRIVASTAVA A.; MATHUR J.; MATHUR S.. AGRAWAL G.D.. Transient effect of soil thermal diffusivity on performance of EATHE system, *Energy Reports*, Volume 1, p17-21, ISSN 2352-4847, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2014.11.004>

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484714000079>)

MARTINES E.; LIRA L.. Dew point calculation at different pressures. *Metrology Symposium*. SM2008-M117-1098-1. 2008.

MIHALAKAKOU G., LEWIS J.O. The influence of different ground covers on the heating potential of earth-to-air heat exchangers *Renewable Energy*, v.7, pp. 33–46, 1996.

MIRANDA, R. C. Simulação de tanque de condicionamento de reagentes por

Mecânica dos Fluidos Computacional. M.S. Thesis; Department of Chemistry, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte. 67p. 2009.

MOLINA-AIZ, F.D.; FATNASSI, H.; BOULARD T.; ROY J.C.; VALERA D.L..Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses Original Research Article Pages 69-86 2010  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910000554>

MONGKON S.; THEPA S.; NAMPRAKAI P.; PRATINTHONG N.. Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earth tube system for the tropical greenhouse, Energy and Buildings, Volume 66, , Pages 104-111, ISSN 0378-7788, November 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.009>.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813003976>

MORAIS, P.L.D.; DIAS,N.D.; ALMEIDA, M.L.B.; SARMENTO, J.D.A.; NETO, O.N.S. Qualidade pós-colheita da alface hidropônica em ambiente protegido sob malhas termorefloras e negra. Revista Ceres, Viçosa, v. 58, n.5, p. 638-644, set/out, 2011.

OZGENER O., OZGENER L., GOSWAMI D.Y. Experimental prediction of total thermal resistance of a closed loop EAHE for greenhouse cooling system International Communications in Heat and Mass Transfer, v.38, pp. 711–716, 2011.

PAPADAKIS G., BRIASSOULIS D., MUGNOZZA G.S., VOX G., FEUILLOLEY P., STOFERS G.A. Radiometric and thermal properties and testing methods for greenhouse covering materials Journal of Agricultural Engineering Research, 77, pp. 7–38, 2000.  
<http://dx.doi.org/10.1006/jaer.2000.0525>

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002 a. 478p.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. Análise quantitativa do crescimento de

comunidade vegetal. Campinas: Instituto Agronômico, (Boletim Técnico), 114. 33p. 1987.

PEREIRA, R. S. G.; SANTOS JUNIOR, G.. Modelagem matemática e o ensino de ajuste de funções: um caderno pedagógico. *Bolema* [online]., vol.27, n.46 [cited 2014-12-12], pp. 531-546 . 2013.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-636X2013000300013>.

ROMANINI, C. E. B.; GARCIA, A. P.; ALVARADO, L. M.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.; Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online]. vol.14, n.11, pp. 1194-1201, 2010.

<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001100009>.

ROY, J.C.; BOULARD T.. CFD Prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: Influence of wind direction and sensibility to turbulence models *Acta Horticulturae*, 691, pp. 457–464, 2005.

ROY, J.C., BOULARD, T., LEE, I.B., CHAVE, M., NIETO, C. CFD prediction of the distribution and deposition of fungal spores in a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 719, pp. 279-286, 2006.

ROY, J.C., VIDAL, C., FARGUES, J., BOULARD, T. CFD based determination of temperature and humidity at leaf surface. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61 (2), pp. 201-212, 2008.

SANTOS, J.A. et al. Efeito do calcário dolomítico e nitrato de potássio no desenvolvimento inicial de mudas da bananeira ‘Prata-Anã’ (AAB), provenientes de cultura in vitro. *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 150-154, 2004.

SANTOS, L. L.; SEABRA JUNIOR, S.; NUNES, M. C. M. Luminosidade, Tar e do solo em ambientes de cultivo protegido. *Revista de Ciências Agro-Ambientais*, v. 8, n.1, p. 83- 93, 2010.

SAPOUNAS A. A.; MARTZOPOULOU-NIKITA C. H.; MARTZOPOULOS G. Computational Modelling of Ventilation process in a naturally ventilated experimental livestock building. Proceedings of international conference: 'New trends in Farm Buildings', Evora—Portugal, 2004.

SAPOUNAS, A.; BARTZANAS, T.; NIKITA-MARTZOPOULOU, C.; KITTAS, C.. Fan and Pad Evaporative Cooling System for Greenhouses: Evaluation of a Numerical and Analytical Model. *Acta Horticulturae*, v.797, p131-137, 2008.

SEEMANN, J. Greenhouse climate. In: SEEMANN, Journal Agrometeorology. New York: Springer- Verlag, 1979. p.165-178.

SCHIEDECK, G.; MIELE, A.; BARRADAS, C.I.N.; MANDELLI, F. Fenologia da videira 'Niágara Rosada' cultivada em estufa e a céu aberto. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, p.199-206, 1997.

SHAOJIN W., BOULARD T. Measurement and prediction of solar radiation distribution in full-scale greenhouse tunnels *Agriculture and Environment*, v.20, pp. 41–50, 2000.

STAMPS, R. Use of colored shade netting in horticulture. *HortScience* 44:239-241, 2009.

STOFFERS J.A. Influence of material properties on greenhouse climate *Acta Horticulturae*, 281, pp. 231–245, 1990.

TANNY, J.. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review, *Biosystems Engineering*, Volume 114, Issue 1, Pages 26-43, , January 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.008>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101200181X>)

TEITEL M., SHKLYAR A.. Pressure Drop Across Insect-Proof Screens Transactions of the ASABE. VOL. 41(6): 1829-1834, 1998. (doi: 10.13031/2013.17336)

TIWARI, G.N. Greenhouse technology for controlled environment in India. Narosa Publishing House. 2003.

de la TORRE GEA, G. A.. Modelación del flujo de aire mediante Dinámica de Fluidos Computacionales en invernaderos con ventilación natural Tese de Doutorado 2014. <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/905>

TRIGUI, M. BARRINGTON S.F., GAUTHIER L. Effects of humidity on tomato water uptake, yield, and dehumidification cost Canadian Agricultural Engineering, 41 (3), pp. 135–140, 1999.

VAZQUEZ I. C. O.. Dinamica de fluidos computacional al estudio 3D de la ventilacion y temperatura de un conjunto de invernaderos, Amazcala. Tesis de Maestría em ingenaria de biosistemas, 2013  
<http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1576/1/RI001131.pdf>

WANG X.; LUO J.; LI X.. CFD Based Study of Heterogeneous Microclimate in a Typical Chinese Greenhouse in Central China, Journal of Integrative Agriculture, Volume 12, Issue 5, p914-923, ISSN 2095-3119, 2013  
[http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60309-3](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60309-3).  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311913603093>)