



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola

Bruna Piccolotto Dessunti
RA 101656

**Modelagem de sistema de controle de umidade relativa do ar
em casa de vegetação com produção de forragem**

Campinas
2016



Universidade Estadual De Campinas
Faculdade De Engenharia Agrícola

Bruna Piccolotto Dessunti
RA 101656

Modelagem de sistema de controle de umidade relativa do ar em casa de vegetação com produção de forragem

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Agrícola à
Faculdade de Engenharia Agrícola da
Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Dr. Angel Pontin Garcia

Campinas
2016

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

D472m Dessunti, Bruna Piccolotto, 1989-
Modelagem de sistema de controle de umidade relativa do ar em casa de
vegetação com produção de forragem / Bruna Piccolotto Dessunti. – Campinas,
SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Angel Pontin Garcia.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Modelagem. 2. Controle de umidade. 3. Vegetação. 4. Forragem. I. Garcia,
Angel Pontin, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Palavras-chave em inglês:

Modeling

Moisture control

Vegetation

Fodder

Titulação: Engenheiro Agrícola

Banca examinadora:

Juliana Aparecida Fracarolli

Thais Queiroz Zorzeto Cesar

Data de entrega do trabalho definitivo: 12-12-2016



Modelagem de sistema de controle de umidade relativa do ar em casa de vegetação com produção de forragem

Bruna Piccolotto Dessunti
RA101656

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. Angel Pontin Garcia

.....
Prof. Dra. Juliana Aparecida Fracarolli

.....
Dra. Thais Queiroz Zorzeto Cesar



RESUMO

O controle da umidade relativa do ar durante o crescimento das plantas é essencial, devido à sua influência na prevenção de doenças, na carga térmica, seja de aquecimento ou de resfriamento, e na redução do uso de água nas casas de vegetação. Sendo assim, o objetivo desse estudo foi desenvolver um sistema de controle da umidade relativa do ar em uma casa de vegetação com produção de forragem hidropônica.

Iniciou-se o trabalho com o balanço de energia e massa e, posteriormente, modelou-se o sistema com o auxílio do *software* SIMULINK. Com isso, foi possível simular o comportamento das variáveis, temperatura e umidade relativa do ar, no dia mais crítico do ano de 2016. Sendo assim, pode-se afirmar que o melhor período para ativação do sistema de exaustão é entre 12h e 16h devido à menor umidade relativa do ar externo. Há economia de energia no sistema de exaustão neste período, pois o intervalo que o mesmo permanece ativado foi consideravelmente reduzido em relação aos demais períodos do dia. Além disso, observou-se que o sistema manteve a umidade relativa do ar interno na faixa ótima para a produção de forrageira hidropônica ao longo do dia mais crítico de verão.

Palavras-chave: Modelagem; Controle de Umidade Relativa; Casa de Vegetação; Forragem Hidropônica.



ABSTRACT

Controlling the relative humidity of the air during plant growth is essential because of its influence on disease prevention, on the temperature control, either heating or cooling, and reducing the water use in greenhouse. Therefore, the objective of this study was to develop a system to control the relative humidity of the air in a greenhouse with hydroponic forage production.

The work began with the energy and mass balance and, later, the system was modeled using SIMULINK software. This allowed simulating the behavior of the variables, temperature and relative air humidity, in the most critical day of the year in 2016. Thus, it was stated that the best period for activating the exhaust system is between 12am and 4pm due to the external air lower relative humidity. There is energy saving in the exhaust system in this period, because the interval that it remains activated was considerably reduced in relation to the other periods of the day. In addition, it was observed that the system maintained the relative humidity of the internal air in the optimal range for the hydroponic forage production during the most critical summer day.

Key Words: Modeling, relative humidity control, greenhouse, hydroponic forage.



Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. JUSTIFICATIVA	10
3. OBJETIVOS	10
3.1 Objetivo geral	10
3.2 Objetivos específicos	10
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1. Forragens hidropônicas	10
4.2. Sistema hidropônico	10
4.3. Cultivo protegido	10
4.4. Modelagem para controle de umidade relativa do ar	11
5. MATERIAL E MÉTODOS	11
5.1. Casa de Vegetação	11
5.2. Características básicas da cultura	12
5.3. Balanço de energia e massa	12
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
7. CONCLUSÃO	20
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1. INTRODUÇÃO

Fenômenos naturais adversos, produto cada vez mais comum da alta variabilidade do clima, ocorrem muitas vezes sem que se tenham reservas suficientes de pastagens, feno e silagem. Isto resulta na necessidade, especialmente nos pequenos e médios agricultores, de produção alternativa para combater ou prevenir perdas na produção animal (abortos, perda de peso, pobres volumes de leite, atrasos e/ou problemas de fertilidade, etc.), por meio de casas de vegetação onde se produzam forragens.

A produção de forragem verde hidropônica (FVH) é uma tecnologia que gera biomassa vegetal obtida a partir do desenvolvimento de plântulas, originadas de sementes viáveis. Esse produto tem alta digestibilidade, palatabilidade e qualidade nutricional, sendo adequado para a alimentação animal (CONCHA, 1988; e ALADRO, 1987).

Na prática, a FVH é a germinação dos grãos e subsequente crescimento em condições ambientais controladas (luz, temperatura e umidade), na ausência de solo. As sementes de aveia são as mais utilizadas, seguida de cevada, milho, trigo e sorgo.

O processo é realizado em uma casa de vegetação, utilizando-se de recipientes planos e por um período menor que 12 dias, realizando irrigação com água até que os brotos atinjam um comprimento de 3 a 4 centímetros. A partir desse momento as regas são contínuas e com solução nutritiva, visando fornecer os elementos químicos necessários (especialmente o nitrogênio) requerido para o crescimento ótimo da forragem (MIRANDA, 1985; ORUETA, 1987).

Casas de vegetação são estruturas cobertas utilizadas para produção de diferentes tipos de plantas e cultivos, protegendo-os contra os agentes meteorológicos externos, mas, também, como um meio controlado no qual o crescimento da planta depende de fatores como a água, a iluminação, os fertilizantes, o oxigênio e o dióxido de carbono (CO₂) (BELTRÃO, 2002; e VISCHI FILHO, 2002).

Um sistema de controle climático se faz necessário para a produção vegetal, devendo este ser integrado ao processo, considerando-se as estratégias de controle, os sensores e os sistemas de aquisição e processamento dos dados. A utilização de malhas de controle automático com realimentação pode ser uma solução adequada, devido às vantagens que oferecem, em termos da resposta e atuação.

Antes da definição das estratégias e projeto das malhas de controle, deve-se realizar um estudo preliminar a fim de que a implantação contribua para à otimização, racionalização e qualidade do processo e do produto, observando-se todas as funcionalidades de gestão das variáveis envolvidas. Deve-se, também, contemplar a

identificação das variáveis mensuráveis e as que serão controladas. As estratégias de controle projetadas são baseadas nos sinais das variáveis controladas e, também, em dados históricos do processo. Os modelos dinâmicos foram descritos utilizando equações diferenciais em função do tempo que, se corretamente combinadas, podem gerar a resposta das variáveis analisadas para o estabelecimento de estratégias adequadas de controle que norteiam este projeto.

O controle da umidade relativa do ar durante o crescimento das plantas é essencial, devido à sua influência na prevenção de doenças, na carga térmica, seja de aquecimento ou de resfriamento, e na redução do uso de água nas casas de vegetação. O controle da umidade através da ventilação pode ser usado para reduzir a umidade interna em casas de vegetação em períodos quentes, uma vez que valores de umidade acima de 90% devem ser evitados, por serem críticos no controle de doenças e pragas. Quando há uso de ventilação forçada em casas de vegetação localizadas em regiões de clima subtropical, o controle da umidade relativa do ar é mais eficiente em razão da diferença entre a umidade relativa do ar externo e o interno (MARTINEZ, 1994).

Figura 1. Protótipo desenvolvido para produção de forragem hidropônica



2. JUSTIFICATIVA

O controle da umidade relativa do ar durante o crescimento das plantas é essencial, devido à sua influência na prevenção de doenças, na carga térmica, seja de aquecimento ou de resfriamento, e na eficiência do uso de água nas casas de vegetação. Para um melhor desenvolvimento vegetal um sistema de controle do ambiente se faz necessário, devendo este ser integrado ao processo, considerando-se as estratégias de controle, os sensores e os sistemas de aquisição e processamento dos dados.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de controle da umidade relativa do ar em uma casa de vegetação com produção de forragem hidropônica.

3.2 Objetivos específicos

- Modelagem do sistema de umidade relativa do ar na casa de vegetação;
- Simulação através dos balanços de energia e massa em função da variação das propriedades térmicas e físicas e das variáveis meteorológicas;
- Projetar um sistema de controle de umidade, por meio de um exaustor.
- Simular o sistema de controle em conjunto com o modelo da casa de vegetação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Forragens hidropônicas

O cultivo de forragens por hidroponia em ambiente protegido constitui uma alternativa para obtenção de volumosos de forma regular ao longo do ano (AMORIM, 2000), suprimindo a necessidade de muitos pecuaristas, no caso pequenos e médios produtores, de quantidade suficiente de alimentos para fornecer aos animais durante todo o ano onde há área física reduzida para o plantio de pastagens, o que dificulta a terminação dos mesmos e, portanto, o incremento de suas rendas.

Esse volumoso apresenta vantagens em relação à silagem ou feno, o ciclo é rápido para produção contínua e apresenta alta produtividade por área (OLIVEIRA, 1998). Além disso, pode ser administrada aos animais em qualquer fase de desenvolvimento (FLORES, 2004).

Segundo a FAO (2001) o fornecimento de forragem hidropônica de aveia para os animais proporcionou aumento de 18% na produção leiteira, constatando-se também média de ganho de peso diário de 0,240 kg e conversão alimentar de 4,68 kg de peso vivo.

4.2. Sistema hidropônico

Os cultivos hidropônicos representam uma alternativa aos sistemas convencionais por possibilitar a obtenção de produtos de boa qualidade, de maior uniformidade e com menor gasto de água (CASTELLANE & ARAÚJO, 1994; FAQUIN, 1996; RESH, 1997; GARCIA, 1998; GUALBERTO, 1999), representando uma alternativa promissora para a diversificação do agronegócio. Destacam-se, também, outras motivações em relação à tecnologia de cultivo hidropônico, dentre elas: maior rendimento por área, maior facilidade de execução dos tratamentos culturais, melhor programação de produção e ciclos mais curtos, em decorrência de melhor controle ambiental (MARTINEZ & BARBOSA, 1996).

4.3. Cultivo protegido

Dentre as vantagens do cultivo protegido, listou-se abaixo as principais, tais como:

- Maior qualidade na alimentação animal gerando maior lucro - Para que os animais possam expressar todo o seu potencial genético, uma boa nutrição é essencial durante todo o seu desenvolvimento. Por isso, produzir alimento em boas condições

sanitárias e com controle de todo o desenvolvimento da cultura é essencial para se obter um produto final com excelentes níveis nutricionais e segurança alimentar. Desta forma, com uma alimentação de qualidade o animal aumenta o seu desempenho, agregando valor e aumentando o lucro do produtor.

- Produção protegida de pragas - O cultivo acontece em local fechado e, portanto, evita-se o ataque de pragas que podem diminuir a produtividade ou mesmo contaminar a cultura a nível de tornar a sua utilização inviável.
- Produção independente de fatores meteorológicos externos – A influência de fatores meteorológicos é mínima se comparada as culturas em ambiente aberto. Em cultivo protegido busca-se atingir as condições ótimas de produção a partir do controle das variáveis que influenciam no desenvolvimento das plantas. Com isso, o produtor tem uma produção constante, auxiliando-o em seu planejamento.
- Agricultura econômica e sustentável - Há uma grande economia de tempo, espaço e recursos financeiros já que atinge o produto final em no máximo 12 dias, não é necessário o preparo do solo, a movimentação de linhas de irrigação e a etapa de colheita. Além disso, é uma agricultura sustentável pois evita a degradação do solo, apresenta um baixo consumo de água e de energia, sendo favorável ao pilar ambiental da sustentabilidade.

4.4. Modelagem para controle de umidade relativa do ar

O controle da umidade relativa do ar pode ser feito através dos sistemas de climatização, conforme Tawegoum (2006). A eficiência energética em casas de vegetação, em função da diminuição do consumo de energia elétrica, provocado pelo controle da temperatura do ar, vem sendo tratado e discutido nos últimos anos, como mostra o trabalho desenvolvido por Sigrimis (2000). O controle da vazão de ar de ventilação em casas de vegetação contribui para manter a temperatura, a umidade relativa e a concentração de CO₂ dentro dos níveis recomendados, como comprovado por Khaoua (2006).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Casa de Vegetação

A casa de vegetação (Figura 1) está instalada na cidade de Campinas, no Estado de São Paulo, e possui latitude 22°54'20"S, longitude 47°03'39"W e altitude 854m. Os dados

climáticos da região foram obtidos através do posto meteorológico do CEPAGRI. Com isso, calcularam as temperaturas críticas máxima e mínima, os parâmetros médios para o verão e, também, as propriedades psicrométricas, conforme Apêndice I (Cenários de temperatura e umidade). Além disso, visando minimizar a incidência de radiação solar nas laterais casa de vegetação portátil, foi definida que a orientação da estufa será no sentido leste - oeste. Vide figura 2.

Figura 1. Protótipo
3m x 1,5m x 2,5m (c x l x h)

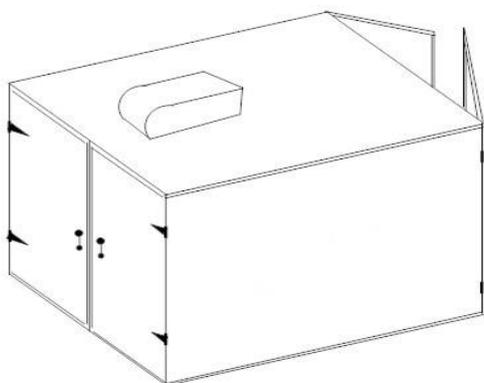
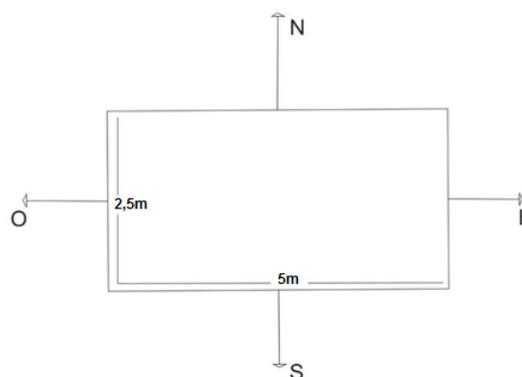


Figura 2. Orientação da casa de vegetação



5.2. Características básicas da cultura

A aveia é uma planta da família das gramíneas, como milho, o trigo e os capins. Ela divide-se em três espécies: Aveia preta (*Avena Strigosa*), Aveia amarela (*Avena Bysantina*) e Aveia branca (*Avena sativa*). A aveia branca é uma excelente produtora de grãos, é cultivada tanto para a produção de grãos para alimentação humana e animal como forrageira para pastejo direto.

Para o experimento utilizou-se como referência a faixa de umidade ótima para a aveia branca de 75% a 80% e faixa de temperatura de zona de conforto entre 18°C a 26°C (CORTAZZO, 2001).

5.3. Balanço de energia e massa

Para simular a umidade interna foi utilizado o balanço de energia, representado pela equação (1), e balanço de massa. Analisou-se uma casa de vegetação fechada apenas para o dia mais crítico do verão.

A simulação da temperatura média interna da casa de vegetação (T_i), por meio do balanço de energia foi baseada nas equações de ASHRAE (1978) e HELLICKSON (1983), e envolveu as variáveis climáticas ao longo de um dia crítico com a temperatura do ar externo, umidade relativa do ar externo, radiação solar externa à casa de vegetação, entre outras constantes físicas que podem ser extraídas de ALBRIGHT (1990), assim como dados do produto que podem ser extraídos de CORTAZZO (2001). Esse balanço de energia foi estimado pela eq.(1) (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983).

$$Q_{rad} + Q_{eq} + Q_{aq} + Q_{resp} = Q_{cnd} + Q_{pis} + Q_v + Q_{sl} + Q_{fot} + Q_{rtc} \quad (1)$$

Em que cada variável corresponde à:

Q_{resp} - calor sensível de respiração do produto [W];

Q_{eq} - calor de motores, equipamentos, luminárias, etc.[W];

Q_{rad} - calor sensível proveniente do Sol [W];

Q_{aq} - calor sensível do sistema de aquecimento [W];

Q_v - calor sensível do ar de ventilação (natural ou forçado) [W];

Q_{cnd} - calor sensível de condução da estrutura [W];

Q_{pis} - calor sensível transferido ao solo ou piso pelo perímetro [W];

Q_{sl} - calor sensível convertido em calor latente dentro do espaço interno [W];

Q_{fot} - calor sensível usado para a fotossíntese [W];

Q_{rtc} - calor de transmitância térmica [W].

A seguir tem-se as equações de calor, que compõem o balanço de energia, de maneira detalhada, equação 2 até equação 13.

O calor sensível proveniente do Sol (Q_{rad}), eq.(2), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{rad} = \tau I_e A_p \quad (2).$$

Em que, τ - transmitância da superfície da cobertura em relação à radiação solar global (ALBRIGHT, 1990), adimensional; I_e - radiação solar global externa, $W\ m^{-2}$, e A_p - área do piso da casa de vegetação, m^2 .

O calor sensível de respiração do produto (Q_{resp}), eq.(3), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{resp} = 0,10 Q_{fot} \text{ (3).}$$

Em que, Q_{fot} - calor de fotossíntese, W; Para $Q_{resp} = m_p \times TR$, onde: m_p é a massa do produto em kg e TR é a taxa de respiração do produto em $W \text{ kg}^{-1}$.

O calor de fontes de energia mecânica, luminosas (iluminárias) e pessoas (Q_m), eq.(4), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_m = F \text{ PE} + \text{iluminação} + \text{pessoas} \text{ (4)}$$

Em que, F - fator de potência do equipamento, adimensional; PE - potência elétrica do equipamento, W; iluminação - calor perdido pela potência de lâmpadas, W, e pessoas - calor cedido por pessoas, W.

O calor sensível do sistema de aquecimento (Q_{sa}), eq.(5), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{sa} = PC \text{ (5)}$$

Em que, PC - potência calorífica da fonte aquecedora, W.

O calor sensível usado para a fotossíntese (Q_{fot}), eq.(6), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{fot} = 0,03 Q_{so} \text{ (6)}$$

O calor de condução da estrutura (Q_{cond}), eq.(7), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{cond} = U A_c \Delta T \text{ (7)}$$

Em que, U - coeficiente global de transferência de calor do plástico, $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (ALBRIGHT, 1990); A_c - área do contorno da casa de vegetação, m^2 ; ΔT - temperatura interna - temperatura externa ($T_i - T_e$), K, e T_i - incógnita do balanço de energia, K.

O calor sensível transferido ao solo ou piso pelo perímetro (Q_{sp}), eq.(8), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{sp} = F \text{ Per} \Delta T \text{ (8)}$$

Em que, F - fator perimetral, $W m^{-1} K^{-1}$; Per - perímetro da estufa plástica, m , e ΔT - temperatura interna - temperatura externa ($T_i - T_e$), K .

O calor de ventilação (Q_v), eq.(9), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_v = Q_{ve} - Q_{vs} = m c_p \Delta T \quad (9)$$

Em que, m - fluxo mássico de ar seco, $kg s^{-1}$, e c_p - calor específico do ar externo, $J kg^{-1} K^{-1}$. A relação entre o fluxo volumétrico (V) e o fluxo mássico m , eq.(10), é descrita conforme a expressão (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$V = m / \rho \quad (10)$$

Em que, V - fluxo volumétrico, $m^3 s^{-1}$, e ρ - densidade do ar externo, $kg m^{-3}$.

O fluxo volumétrico para a ventilação natural, eq.(11), é dado por (HELLICKSON, 1983):

$$V = E V_v A_a \quad (11)$$

Em que, E - eficiência das aberturas, adimensional. (Para estruturas agrícolas adota-se $E = 0,85$; Adotou-se ao invés de velocidade de vento externo e área da abertura a vazão (Q_{ex}) de ar promovida pelo exaustor, m^3/h , resultando na equação (11a):

$$V = E Q_{ex} \quad (11a)$$

O calor sensível convertido em calor latente (Q_{sl}), eq.(12), é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{sl} = ET F_p Q_{so} \quad (12)$$

Em que, ET - razão entre a radiação solar e a energia associada com a evapotranspiração da cultura, adimensional, recomenda-se 0,5 segundo (HELLICKSON, 1983), e F_p - fator de cultivo (área de cultivo/área do piso), adimensional.

O calor de transmitância térmica (Q_{rtc}), eq.(13) é definido como (ASHRAE, 1978; HELLICKSON, 1983):

$$Q_{rtc} = \epsilon_{sup} \gamma_t \sigma A_p (T_i^4 - \epsilon_t T_e^4) \quad (13)$$

Em que, ϵ_{sup} - emissividade do piso ou vegetação, adimensional; γ_t - transmitância térmica do plástico na reirradiação, adimensional; A_p - área do piso, m^2 ; σ - constante de Stefan Boltzmann, $5,678 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; T_e - temperatura externa, K; T_i - temperatura interna, K, e ϵ_{ar} - emissividade do ar local, adimensional (HELLICKSON, 1983).

Os valores dos termos a seguir foram considerados nulos: Q_{eq} , Q_{aq} , Q_{pis} e Q_{rtc} . O valor de Q_{sl} é muito difícil de ser medido, segundo ASHRAE (1978), podendo, também, ser desconsiderado. Portanto, partindo da equação geral (1), eliminando os termos desprezíveis, obtém-se uma equação mais reduzida:

$$Q_{rad} + Q_{resp} = Q_{cnd} + Q_v \quad (14)$$

Para a simulação da temperatura interna foi utilizado o balanço de energia representado pela equação (14) na Tabela 1, abaixo, juntamente com os dados de entrada no modelo.

Tabela 1 – Dados de entrada utilizados na modelagem do sistema

Nº	Equação	Constantes
2	$Q_{rad} = \tau \cdot I_e \cdot A_p$	$\tau = 0,92$; $I_e = 709,8 \text{ W.m}^{-2}$; $A_p = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ m}^2$
3	$Q_{resp} = 0,10 \cdot Q_{fot}$	$Q_{fot} = 0,03 \cdot Q_{rad}$; $Q_{rad} = 8 \ 162,7 \text{ W}$
7	$Q_{cnd} = U \cdot A_c \cdot \Delta T$	$U = 6,8 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; $A_c = 27 \text{ m}^2$; $\Delta T = T_i - T_e \text{ [K]}$
9	$Q_v = m \cdot c_p \cdot \Delta T$	m ; $c_p = 1006 \text{ J.Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\Delta T = T_i - T_e \text{ [K]}$

A partir da equação (15) de calor resultante (Q_r):

$$Q_r = Q_{rad} + Q_{resp} - Q_{cnd} - Q_v \quad (15)$$

Obtemos o valor de temperatura interna, conforme demonstrado na modelagem do sistema, vide anexo III.

Para a determinação da umidade relativa interna (UR_i), expressa em porcentagem, após a simulação da temperatura interna (T_i), em K, utiliza-se o balanço de massa, definido pela equação (16), o qual fornece a umidade absoluta interna (W_i) (HELLICKSON, 1983).

$$m W_i = m W_e + M_{ap} \quad (16)$$

Em que,

m - fluxo mássico de ar seco, kg s^{-1} ;

Wi - umidade absoluta interna, kg kg^{-1} (quilograma de vapor de H_2O por quilograma de ar seco);

We - umidade absoluta externa, kg kg^{-1} (quilograma de vapor de H_2O por quilograma de ar seco);

Map - fluxo mássico de água produzida pelas plantas, kgv s^{-1} .

Para a determinação da URi, assumiu-se uma evapotranspiração para a cultura da aveia-branca de $1,00 \text{ mm.dia}^{-1}$ ($1,00 \text{ L/m}^2$ (GONÇALVES et al. 2001)) e, tendo uma área de cultivo de $16,8 \text{ m}^2$, determinou-se o fluxo de produção de água pelas plantas (Map) na equação (17). Sendo que, Map é o fluxo de massa de água produzida pelas plantas, ou seja, é a multiplicação entre a evapotranspiração e a área de cultivo.

$$\text{Map} = \frac{1 \text{ L}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \cdot \frac{16,8 \text{ m}^2}{1} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ Kg água}}{1 \text{ L}} = 0,000194444 \text{ kgv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (17)$$

Em que kgv é quilograma de vapor d'água contida no ar por segundo. Utiliza-se vazão mássica, pois a vazão volumétrica é menos precisa. No caso do fluxo mássico de ar (m) que entra na casa de vegetação foi determinado através da equação (18): multiplicando-se o fluxo volumétrico pela densidade do ar (ρ):

$$m = V \cdot \rho \quad (18)$$

Onde ρ é a densidade do ar, com valor de $1,06 \text{ kg/m}^3$ e V é o fluxo volumétrico, sendo a multiplicação entre a eficiência do ventilador, de valor de 0,85, e a vazão do exaustor, de $30,58 \text{ m}^3/\text{h}$.

A umidade absoluta externa, We, é obtida com auxílio do "software Psicro_v1.4", da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, entra-se com os valores horários da temperatura externa e de umidade relativa externa ao longo do dia e obtém-se We demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Umidade absoluta externa ao longo do dia

Horário (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
We (Kg.Kg-1)	0,0147	0,0163	0,0169	0,0175	0,0172	0,0175	0,0174	0,0161	0,0162	0,0163	0,0171	0,0163	0,0162
Horário (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23h59	
We (Kg.Kg-1)	0,0149	0,0126	0,0126	0,0117	0,0109	0,0105	0,0112	0,0137	0,0109	0,0109	0,0154	0,0168	

A radiação solar foi obtida através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e variou conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Radiação Solar ao longo do dia

Horário (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rad (W.m-2.K-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	19	421	1249	2126	2870
Horário (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23h59	
Rad (W.m-2.K-1)	3397	3718	3714	2846	1681	822	65	0	0	0	0	0	

Os valores de temperatura externa foram obtidos através de dados disponibilizados pelo INMET e estão demonstrados abaixo, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Temperatura externa do ar

Horário (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Text (°C)	26	24	23	23	22	22	22	23	22	23	25	27	30
Horário (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23h59	
Text (°C)	32	33	35	36	36	36	34	26	29	29	26	22	

Ressalta-se que as Tabelas 2, 3 e 4 possuem valores periódicos, com intervalo de uma hora, e foram obtidos do dia mais crítico do ano de 2016, sendo este dia 17 do mês de outubro. A partir da simulação do sistema, realizada com o *software* SIMULINK, encontrou-se os valores de W_i e T_i críticos no período estudado. Com isso, determinou-se a UR_i , parâmetro que determina o acionamento do exaustor.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da modelagem do sistema (Apêndice III) fez-se a simulação, obtendo o comportamento da umidade absoluta interna e externa, umidade relativa interna, relação de temperaturas interna e externa, além dos valores obtidos no balanço de energia (calor de condução, radiação, respiração e ventilação).

Observa-se, a partir do Gráfico 3 em Apêndice II, que a temperatura externa inicia um aumento por volta das 6h, momento em que a radiação solar (Gráfico 1 – Apêndice II) começa a incidir sobre a casa de vegetação. Além disso, observa-se um pico de temperatura externa entre 15h e 16h, em que há maior inclinação da linha que representa a temperatura interna (Gráfico 3 – Apêndice II), sendo que esta se estabiliza quando inicia a queda de temperatura externa, por volta das 18h.

A partir do Gráfico 4 (Apêndice II) pode-se afirmar que a umidade relativa interna se comporta com pouca variação, ainda que acompanhe sutilmente a umidade relativa externa, sendo perceptível em torno das 11h.

Pode-se notar que com o exaustor sendo ativado quando a umidade relativa atinge 75%, é possível manter a umidade relativa dentro da zona de conforto da planta, não alcançando valores críticos acima de 85%.

7. CONCLUSÃO

Para manter o controle da elevada umidade relativa interna, faz-se necessário o uso do sistema de exaustão. O período mais efetivo para ativação do sistema de exaustão foi entre 12h e 16h, período regido pela menor demanda de troca de ar através dos ventiladores devido à baixa umidade relativa do ar externo.

Dada a relação entre temperatura e umidade relativa do ar atuantes no ambiente controlado, sugere-se uma análise do comportamento da temperatura do ar para aprimorar o controle do ambiente protegido.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADRO, J.J.M.D. - **Efecto de la Dosis de Siembra, Epoca de Cosecha y Fertilización sobre la Calidad y Cantidad de Forraje de Avena Producido Bajo Condiciones de Hidroponía**. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción, Sede Chillán. Chile, 1987.

ALBRIGHT, L.D. **Environment control for animals and plants**. St. Joseph: ASAE, 1990. 453 p.

AMORIM, A.C.; RESENDE, K.T.; MEDEIROS, A.N. **Produção de milho (*Zea mays*) para forragem, através de sistema hidropônico**. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 38., Viçosa, MG. Anais Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Zootecnia/Gmosis, 2000.

ASHRAE. **Environment control for animals and plants**. In: ASHRAE Handbook of Applications. USA: ASHRAE, 1978. Chapter 22, p.22.1-22.20.

BELTRÃO, N. de M.; Fideles, J.F.; Figueiredo, I. **Uso adequado de casa-de-vegetação e de telados na e experimentação agrícola**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.547-552, 2002.

CASTELLANE, P.D.; ARAÚJO, J.A.C. **Cultivo sem solo – hidroponia**. 4ª ed. Jaboticabal: FUNEP/UNESP, 1994, 43 p.

CONCHA, M.E.N. - **Producción de Forraje en Condiciones de hidroponía II. Selección de Especies y Evaluación de Cebada y Trigo**. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción, Sede Chillán. Chile, 1988.

CORTAZZO, A.S. - **El Manual Técnico “Producción de Forraje Verde Hidropónico”**; 2001

FAO - ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN. **Forraje verde Hidropónico**. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Manual Técnico. Primeira Parte, 2001. 68p.

FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; VILELA, L.A.A. **Produção de alface em hidroponia**. Lavras: UFLA, 1996. 50 p.

FLORES, Z.; URDANETA, G.; MONTES, J. **Densidad de siembra de maíz (*Zea mays*) para producción de forraje verde hidropónico**. In: CONGRESO VENEZOLANO DE PRODUCCIÓN E INDUSTRIA ANIMAL, 12, 2004, Pastos Y Forrajes.

Anais...Venezuela: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Venezuela Universidad Central, Asociación Venezolana de Producción Animal, Maracay. 2004. p. 136.

GARCIA, L.L.C.; HAAG, H.P.; DIEHL NETO, W. **Nutrição mineral de hortaliças: deficiências de macronutrientes em alface** (*Lactuca sativa* L.) cv. Brasil 48 e Clause's Aurélia. In: HAAG, H.P.; MINAMI, K. (Ed.). *Nutrição mineral em hortaliças*. 1988, Campinas, SP: Fundação Cargill, 1988a. p. 77-99.

GONÇALVES, A.O.; OLIVEIRA, J.C.; PERES, J.G. **Determinação das necessidades de água da cultura da alface** (*Lactuca sativa* L.) **sob condições protegidas**. In. CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2001, São Carlos. Anais... São Carlos: UFSCAR/PRG, 2001. 3 p.

GUALBERTO, R.; RESENDE, F.V.; BRAZ, L.T. **Competição de cultivares de alface sob o cultivo hidropônico "NFT" em três diferentes espaçamentos**. *Horticultura Brasileira*. V. 17, n. 2, julho, p. 155-158, 1999.

HELLICKSON, M.A. **Ventilation of agricultural structures**. St. Joseph: ASAE, 1983. 372 p.

KHAOUA, S. A. O.; BOURNET, P. E.; MIGEON, C.; BOULARD, T.; CHASSERERIAUX, G. - **Analysis of greenhouse ventilation based on computational fluid dynamics**. *Biosystems Engineering*, v.95, n.1, p.83-98, 2006.

MARTINEZ, H.E.P.; BARBOSA, J.G. **O cultivo de flores sob hidroponia**. *Boletim de extensão*, Viçosa, n. 38, 1996. 25p.

MARTINEZ, P. F. **The influence of environment conditions of mild winter climate on the physiological behavior of protected crops**. *Acta Horticulturae*, v.357, p.29-48, 1994.

MIRANDA, L.R.H. **Producción de Forraje en Condiciones de Hidroponía. I. Evaluaciones Preliminares en Avena y Triticale**. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción, Sede Chillán. Chile, 1985.

OLIVEIRA, A.C.L. **Forragem hidropônica de milho: alternativa para o desenvolvimento sustentável do agente produtivo**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 1998. 18p.

ORUETA, A.F.M.- **Forraje Hidropónico y su Utilización en la Alimentación de Corderos Precozmente Destetados**. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción, Sede Chillán. Chile, 1987.

RESH, H.M. **Cultivos hidropônicos: Nuevas técnicas de producción.** 4ª ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1997, 378 p.

SIGRIMIS, N.; ANASTASIOU, A.; RERRAS, N. **Energy saving in greenhouses using temperature integration: A simulation survey.** Computers and Electronics in Agriculture, v.26, p.321-341, 2000.

TAWEGOUM, R.; TEIXEIRA, R.; CHASSERIAUX, G. - **Simulation of humidity control and greenhouse temperature tracking in a growth chamber using a passive air conditioning unit.** Control Engineering Practice, v.14, p.853-861, 2006.

VISCHI FILHO, O.J. **Avaliação de casas de vegetação para fins quarentenários de flores com diferentes graus de automação.** Campinas: UNICAMP, 2002. 151p. Dissertação Mestrado

Apêndice I - Cenários de temperatura e umidade

Características meteorológicas da região

Campinas está localizada à uma latitude de 22°54'20"S, longitude de 47°03'39"W e altitude de 854 m.

Tabela 4 - Dados climáticos médios do município de Campinas nos últimos 12 anos

	T máx [°C]	T mín [°C]	UR méd [%]	Vv [m/s]	Direção Predominante	Chuva [mm]
Jan	29,6	19,7	76	7,74	Calmo	304
Fev	30,6	19,8	69	7,87	Calmo	204
Mar	30,2	19,7	70	5,22	Calmo	158
Abr	28,5	17,6	68	7,69	Calmo	60
Mai	25,5	14,3	68	7,38	Calmo	67
Jun	25,2	12,8	65	6,60	Calmo	40
Jul	25,2	12,4	63	7,15	Calmo	59
Ago	27,5	13,9	59	6,75	Calmo	33
Set	28,5	15,8	63	2,53	Calmo	53
Out	29,8	17,8	66	2,67	Calmo	130
Nov	29,5	18,2	70	4,56	Calmo	182
Dez	30,0	19,1	74	5,64	Calmo	223

Cálculo das temperaturas críticas máxima e mínima

Para o cálculo da temperatura crítica máxima, calcularam as médias dos meses dezembro - janeiro - fevereiro e janeiro - fevereiro - março. Os cálculos realizados estão demonstrados abaixo.

- $M_{max1} = \{[T_{max} (dez) + T_{max} (jan) + T_{max} (fev)]/3\} = 30,07$
- $M_{max2} = \{[T_{max} (jan) + T_{max} (fev) + T_{max} (mar)]/3\} = 30,13$ (Crítico)

De acordo com os resultados, a temperatura crítica máxima é 30,13°C referente à média dos meses de janeiro, fevereiro e março.

Cálculo de parâmetros médios para verão

De acordo com o item anterior, o verão ficou estabelecido entre os meses janeiro a março. Desta forma, a Tabela 5 representa os parâmetros médios calculados para verão

na região de Campinas, além das propriedades psicrométricas: densidade específica do ar (ρ_{ar}) e umidade externa, obtidos com o auxílio da ferramenta AGAIS e utilizados no balanço de energia.

Tabela 5 - Parâmetros climáticos médios calculados para verão na região de Campinas

Parâmetros	Verão Jan - Fev - Mar
Temperatura	30,13 °C
Umidade Relativa	72 %
Velocidade do Vento	6,94 m/s
Radiação	6,147 kWh/m ² .dia
Chuva	222 mm
ρ_{ar}	1,03 kg/m ³
We	20,5 g vapor/kg ar seco

Apêndice II – Gráficos a partir da simulação

Gráfico 1 – Comportamento da radiação solar ao longo do dia crítico na região de Campinas

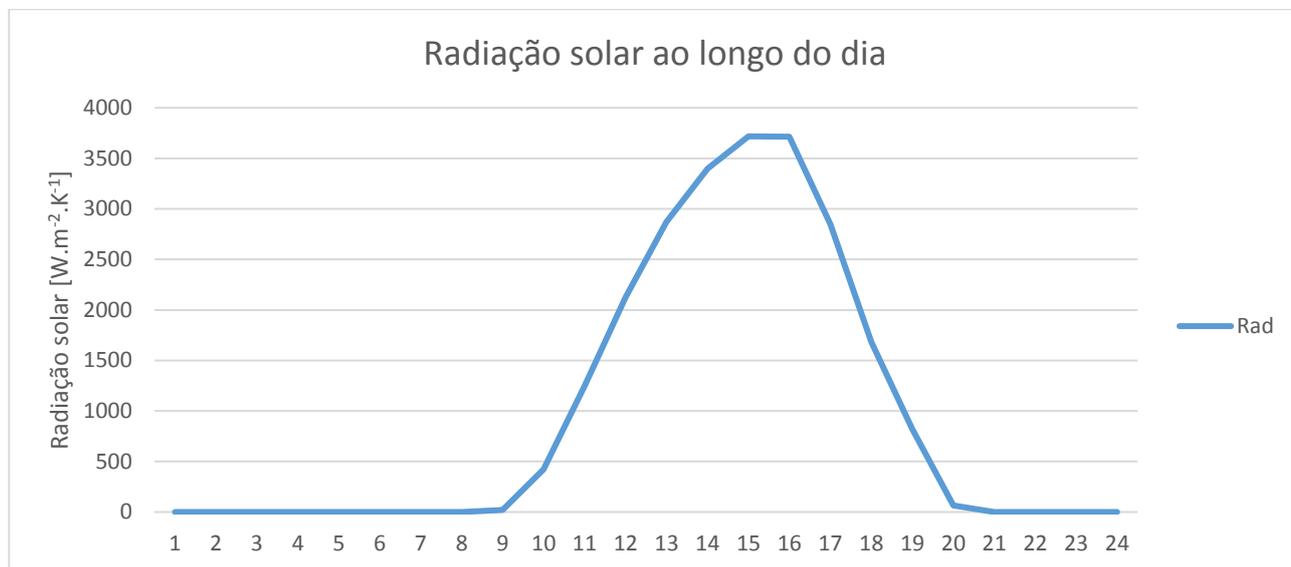


Gráfico 2 – Calor referente à Condução ao longo do dia mais crítico na região de Campinas

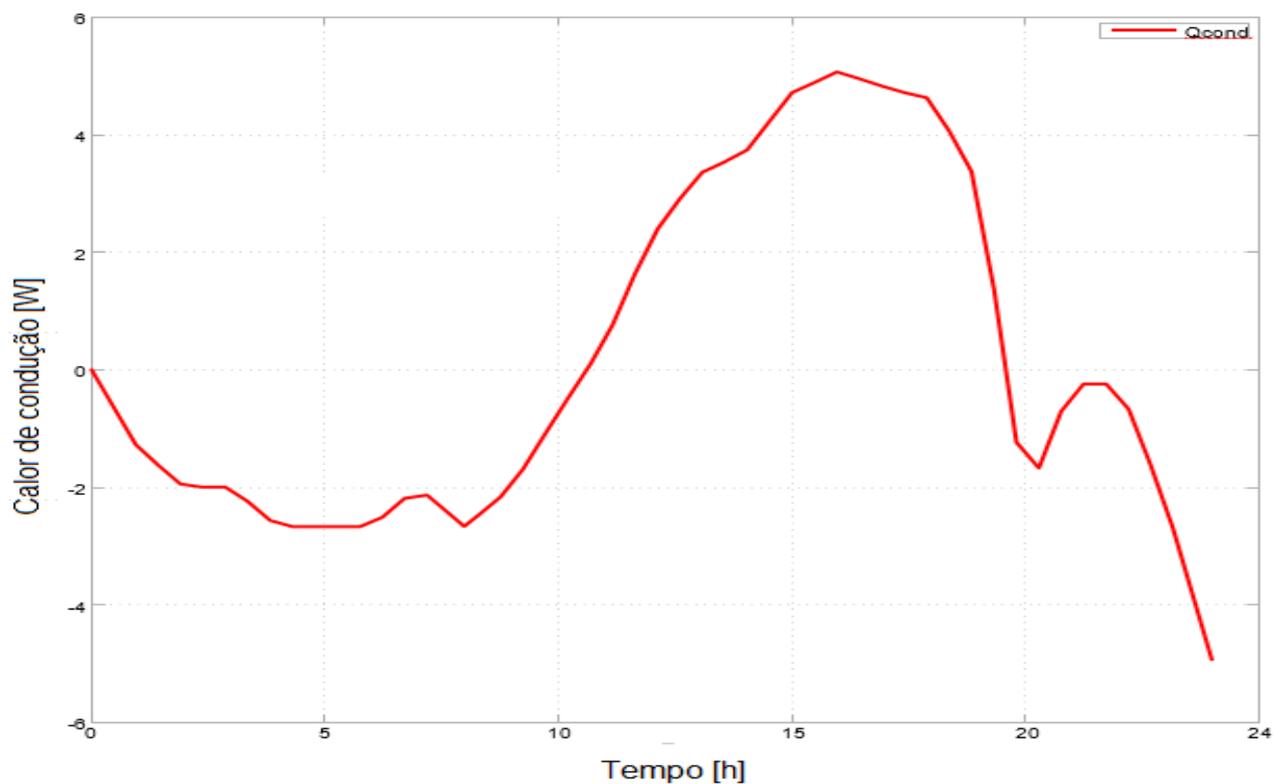


Gráfico 3 – Relação temperatura externa e interna à casa de vegetação

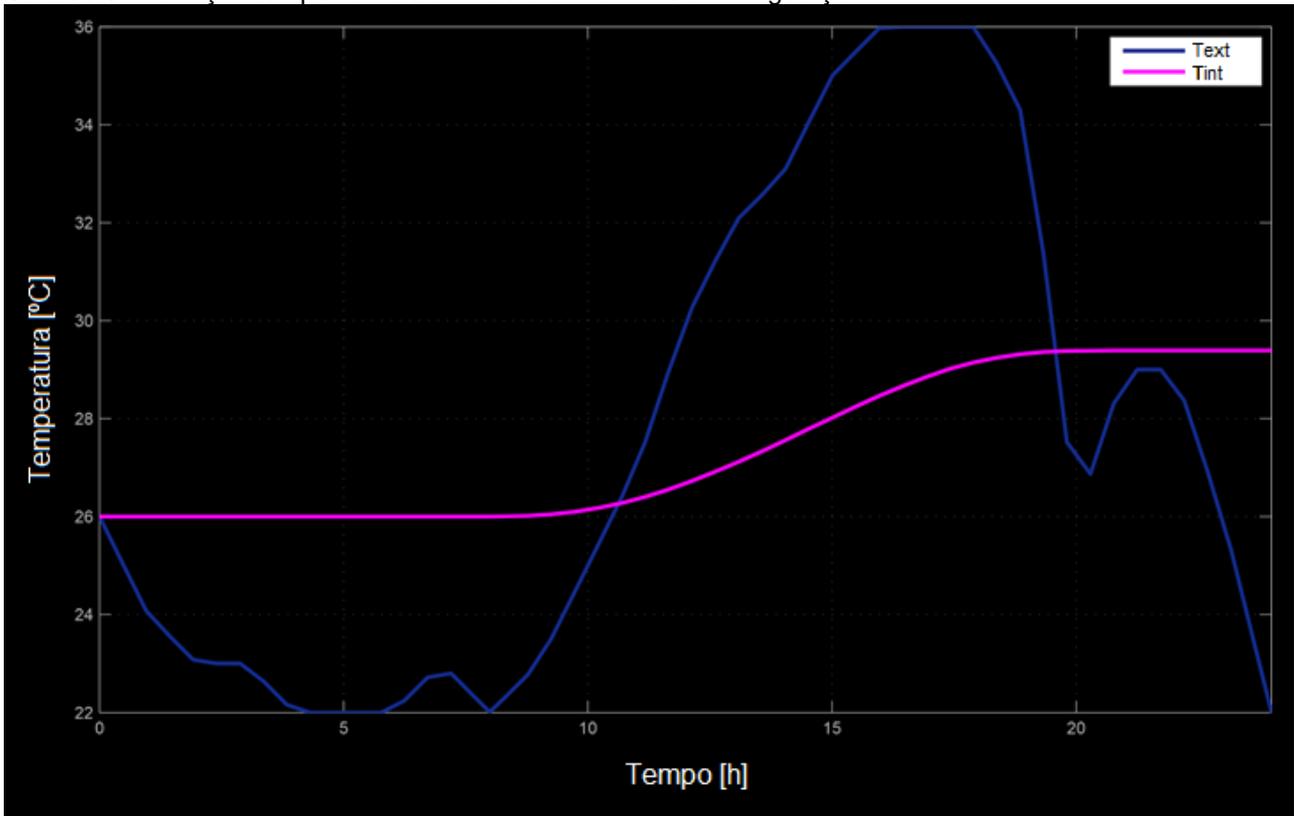


Gráfico 4 – Relação umidade relativa externa e interna à casa de vegetação

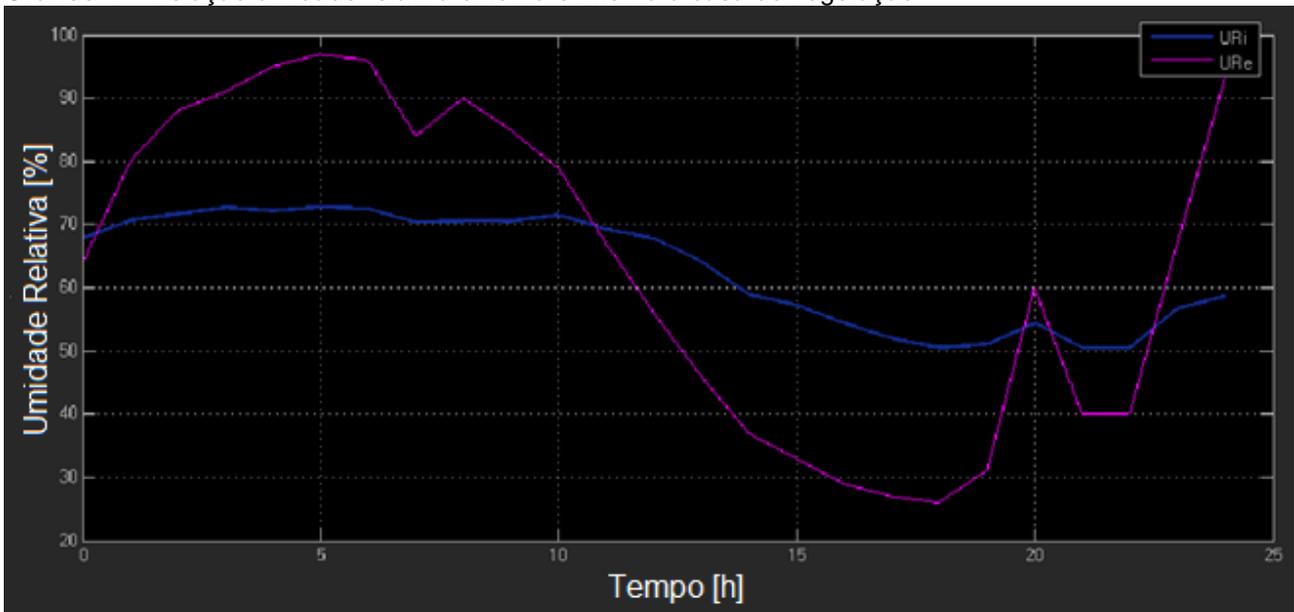
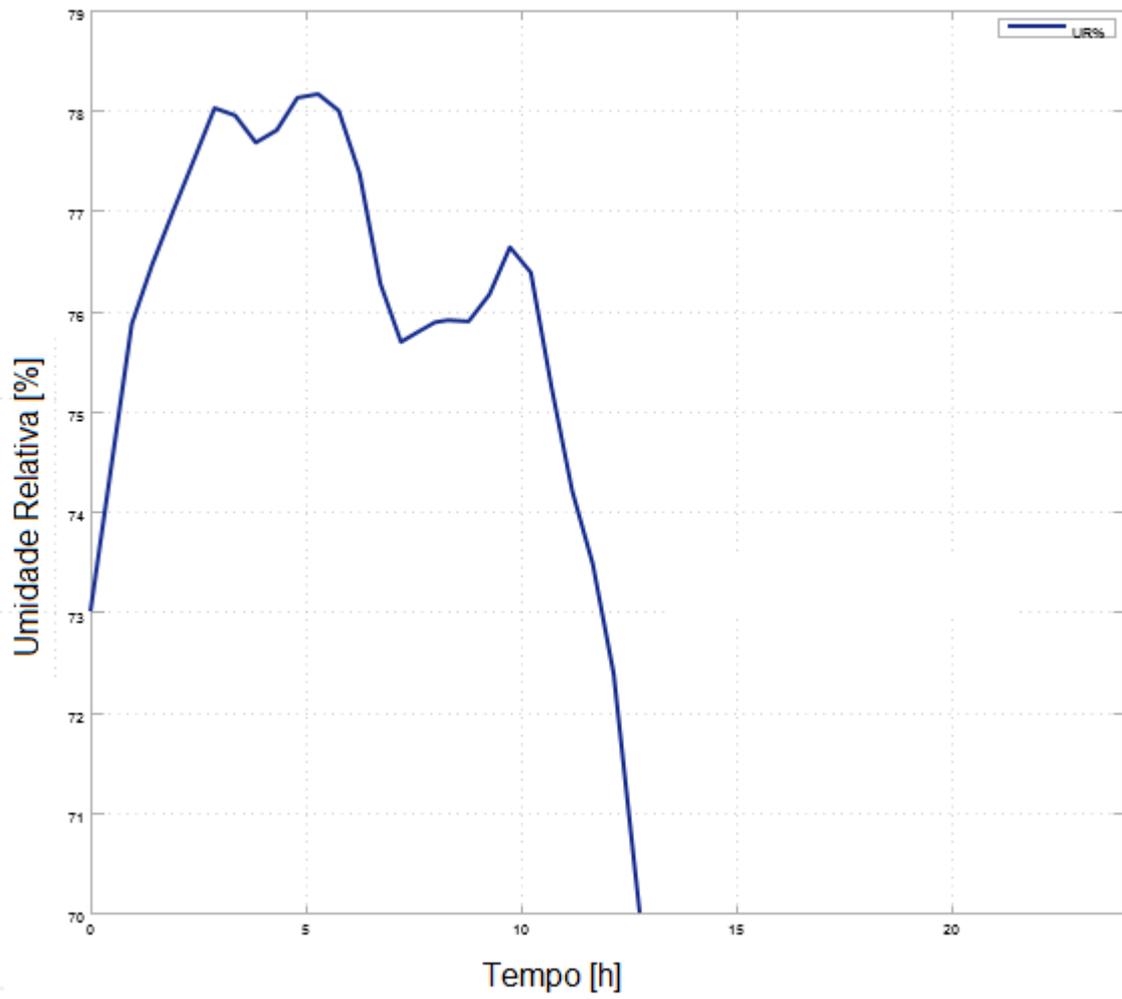


Gráfico 5 – Umidade Relativa no interior da casa de vegetação



Apêndice III – Modelagem do sistema, via SIMULINK.
 Modelo gerado a partir da equação (15) de calor resultante.

