

Análise e simulação do modelo dinâmico de uma estufa agrícola^{*}

Emanuel Thiago de Andrade da Silva,^{*} Moisés Tavares da Silva,^{*}
Lincoln Machado de Araujo,^{*} Ademar Gonçalves da Costa Junior^{*}

^{*} *Laboratório de Instrumentação, Sistemas de Controle e Automação (LINSCA), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa (PB), Brasil, e-mails: emanuel.thiago@academico.ifpb.edu.br, {moisestds,machado.lincoln}@gmail.com, ademar.costa@ifpb.edu.br.*

Abstract: Greenhouses are used to maintain an environment of productive and healthy growth of agricultural crops, which can be obtained by an automatic control system with the objective of modifying the various parameters of the dynamic behavior and optimizing the production of grow crops. Among one the aspects of developing control strategies are those based on mathematical models considering the various physical interactions. This article presents the analysis and simulation of a simplified dynamic model of an agricultural greenhouse. The main purpose is to obtain the dynamic behavior of the internal, greenhouse, and soil temperatures, comparing them with the external temperature. The simulation results indicate that the model presented is capable of representing the dynamics of different temperatures that affect an agricultural greenhouse.

Resumo: As estufas agrícolas são usadas para manter um ambiente de crescimento produtivo e saudável da cultura agrícola, que pode ser obtido por um sistema de controle automático com o objetivo de modificar os diversos parâmetros do comportamento dinâmico, otimizando a produção de um determinado cultivar. Entre uma das vertentes de desenvolvimento de estratégias de controle estão as que se baseiam em modelos matemáticos considerando as diversas interações físicas. Neste artigo, é apresentada a análise e simulação de um modelo dinâmico simplificado de uma estufa agrícola. O objetivo é obter o comportamento dinâmico das temperaturas interna, da cobertura da estufa e do solo, comparando-as com a temperatura externa. Os resultados da simulação indicam que o modelo apresentado é capaz de representar a dinâmica das diferentes temperaturas que afetam uma estufa agrícola.

Keywords: Dynamic model; Greenhouse; Heat balance; Simulation; Temperature.

Palavras-chaves: Balanço de calor; Estufa agrícola; Modelo dinâmico; Simulação; Temperatura.

1. INTRODUÇÃO

A mudança climática afetará significativamente a agricultura, a renda dos agricultores e a segurança alimentar, aumentando a demanda por água, limitando a produtividade das culturas e reduzindo a disponibilidade de água em áreas onde a irrigação é mais necessária. O relatório de 2021 do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) prevê que o aquecimento global possa ultrapassar a marca de 2 °C acima da temperatura atual até 2100, com grandes chances de chegar a 1,5 °C já nos próximos 20 anos, caso as emissões de carbono permaneçam no nível atual (IPCC, 2022). Além disso, a presença de inúmeros insetos e ácaros prejudiciais às lavouras pode estar aumentando devido ao aquecimento global (FAO, 2021).

Assim, a agricultura protegida surge como uma necessidade na produção de alimentos em regiões com problemas agroclimáticos, protegendo todas as culturas das intempé-

ries, pragas e doenças, e mudanças climáticas no planeta. Com a agricultura protegida, a cultura é suprida por seus requisitos ótimos de temperatura, umidade relativa, umidade do solo, ventilação, luz e radiação solar, dióxido de carbono, oxigênio e fertirrigação, com o objetivo de alcançar o melhor desempenho e qualidade das culturas (Reséndez et al., 2011).

As estufas agrícolas, que é uma dos elementos do conceito da agricultura protegida, foram implementadas, originalmente, em regiões frias para aumentar o período da produção dos cultivares, caso contrário, não cresceriam o suficiente. Entretanto, atualmente, as estufas são usadas em diversos tipos de climas, incluindo regiões tropicais. Isso se deve a grande controlabilidade que uma estufa apresenta em relação a um campo aberto junto ao aumento da demanda por alimentos saudáveis de maior qualidade (Enoch and Enoch, 1999).

O crescimento da cultura agrícola é influenciado por variáveis do ambiente e os insumos usados, como a água e os fertilizantes. O principal motivo pelo qual estufas são ideais

^{*} O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do CNPq por meio de bolsa de pesquisa

para prover o crescimento eficiente dos cultivares deve-se ao fato que, em um ambiente fechado, é relativamente fácil identificar as trocas de calor e massa por meio das variáveis climáticas do sistema. Assim, conhecendo essas variáveis, pode-se obter um modelo do sistema e desenvolver estratégias de controle para os parâmetros importantes da estufa, tais como, o ar, a umidade interna e a quantidade de água necessária, entre outros (Sanchez-Molina et al., 2017). A partir do modelo, controladores simples podem ser utilizados, como em Montoya-Ríos et al. (2020), em que foi utilizado um motor CA para abrir e fechar uma janela com o objetivo de controlar a temperatura interna da estufa, apresentando resultados satisfatórios. Entretanto, para aplicar tal controle é necessário conhecer bem as relações físicas da estufa.

Na literatura existem diversos modelos de estufas agrícolas baseadas no balanço de calor. Rodríguez et al. (2015) apresentam um modelo complexo de uma estufa considerando as diversas variáveis do processo. Alguns modelos presentes na literatura focam em um fenômeno específico como, por exemplo, Al-Helal et al. (2015) que consideram, principalmente, a ventilação em uma estufa. Outros modelos, um pouco mais simples, foram desenvolvidos para fins de controle como em Labidi et al. (2017) e Fitz-Rodríguez et al. (2010), em que é considerada uma aproximação para as diferentes temperaturas do sistema e somente as trocas de calor mais significativas são consideradas para o modelo. Em Ali et al. (2020) são realizadas simplificações em relação aos modelos mais complexos, levando em conta as diferentes temperaturas dos componentes da estufa, tais como, cultivar, cobertura, solo e ar interno. Este artigo é baseado, principalmente, nesses três últimos.

Neste artigo é apresentada a análise e simulação de um modelo dinâmico simplificado para uma estufa agrícola. As variáveis de saída consideradas do sistema são as temperaturas dos componentes da estufa, pois afetam, consideravelmente, o processo fisiológico dos cultivares, devendo-se regulá-la em uma faixa de valores que dependerá do seu tipo e de sua localização. A contribuição do cultivar no balanço de calor dentro da estufa foi desconsiderada, bem como as trocas condutivas de calor entre os diferentes componentes da estufa. Para simular o modelo dinâmico da estufa foram considerados os dados da radiação solar, velocidade do vento e temperatura ambiente de uma região da cidade de João Pessoa, Paraíba. Conforme demonstrado nos resultados de simulação, tais simplificações não afetaram a resposta esperada para o modelo. Assim, o modelo simplificado pode ser útil para o desenvolvimento e avaliação de estratégias de controle.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 é apresentada a descrição da estufa agrícola usada neste trabalho e o desenvolvimento do modelo dinâmico. Na seção 3 são apresentadas as considerações aplicadas na simulação do modelo da estufa e os resultados da simulação são discutidos na seção 4. Por fim, as conclusões do trabalho são indicadas na seção 5.

2. DESCRIÇÃO E MODELO DINÂMICO DA ESTUFA AGRÍCOLA

Uma estufa agrícola é um ambiente que permite a maximização da eficiência do crescimento da cultura agrícola

(Jadhav and Rosentrater, 2017). De acordo com Yildiz (2021), fatores como luz e radiação, temperatura, umidade relativa, dióxido de carbono (CO₂), água, nutrição, insetos e doenças são os principais componentes ambientais que afetam o crescimento e o rendimento ideais dos cultivares. Assim, as estufas proporcionam um ambiente adequado para a produção intensiva de uma variedade de cultivares. Elas são projetadas para fornecer um controle ideal da radiação solar, temperatura, umidade relativa, níveis de CO₂ e movimento do ar no ambiente aéreo. No caso de estufas hidropônicas, os níveis de nutrientes e as temperaturas das raízes também podem ser controlados.

Conforme apresentado na Figura 1, os principais elementos de uma estufa agrícola são a cobertura, o solo, os cultivares e o ar interno (Bakker et al., 1995; Yildiz, 2021):

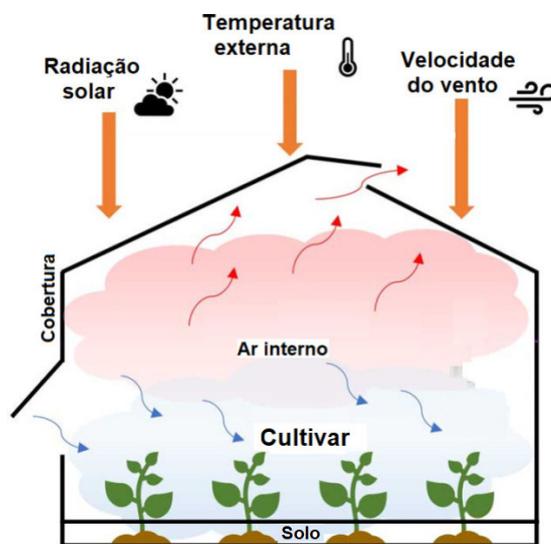


Figura 1. Principais elementos de uma estufa agrícola.
Fonte: adaptado de <https://bit.ly/3CzVbHM>.

- Cobertura: separa o ambiente da estufa (ambiente interno) do ambiente externo. Além disso, a cobertura protege o cultivar de pragas e condições adversas do clima;
- Ar interno: a partir da análise das trocas de calor que envolve o ar interno, é possível estimar a temperatura interna da estufa;
- Cultivar: o tipo de cultura agrícola cultivada determina a temperatura e umidade ideal da estufa. A principal função do cultivar na modelagem é no balanço de água do sistema. Neste trabalho, tais interações são ignoradas;
- Solo: apresenta um papel essencial na absorção e na difusão de efeitos de radiação térmicas.

A interação entre os diferentes componentes da estufa e o clima externo caracteriza as relações de trocas de ar do sistema, importantes para a obtenção das equações do modelo dinâmico. Outro ponto importante é a troca de calor do sistema, caracterizada pelo armazenamento de calor e pela radiação solar através dos processos de troca de energia, que são detalhados matematicamente na seção 2.1.

2.1 Modelo dinâmico da estufa agrícola

Nesta subseção são apresentadas as características e equações do modelo dinâmico da estufa agrícola. Aqui, são realizadas simplificações nas equações de balanço de calor, desconsiderando as trocas de calor condutivas, e os efeitos da ventilação na temperatura, bem como os efeitos do cultivar, da troca de calor entre as paredes e o teto. Tais reduções simplificam o modelo dinâmico, porém, ainda descrevendo adequadamente o comportamento de uma estufa agrícola. As várias trocas termodinâmicas, ou seja, o balanço de calor da cobertura, o solo e o ar interno, são ilustradas, de forma resumida, na Figura 2.

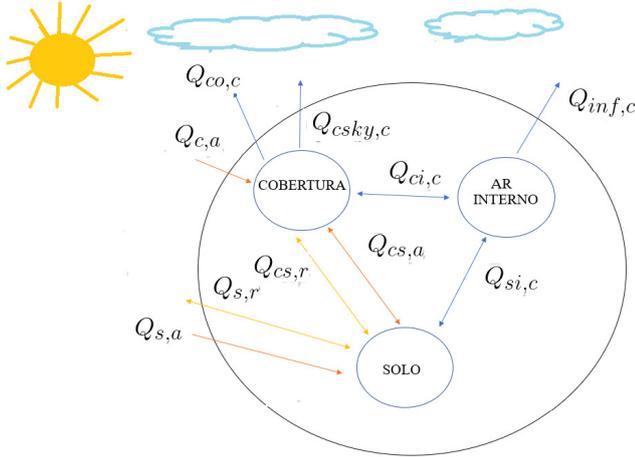


Figura 2. Ilustração das trocas de calor na estufa.
Fonte: adaptado de Ali et al. (2020)

Os parâmetros utilizados para a montagem das equações dessa estufa foram baseados nas características físicas da região de João Pessoa. Os materiais da estufa foram escolhidos de acordo com testes do modelo, visando uma leve retenção de calor, para obter o comportamento desejado da estufa. Os parâmetros considerados no modelo da estufa estão listadas na Tabela 1.

De acordo com Laktionov et al. (2020), a equação geral usada para definir o balanço de calor em qualquer componente da estufa é definida como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{total}}{Ca \times Da \times Si} \quad (1)$$

onde Q_{total} é o balanço de calor no componente analisado. Ca , Da , Si são o calor específico do ar, a densidade do ar, e a área de superfície da estufa, respectivamente. O subíndice em Si é usado para indicar a área da cobertura (S_c), a área do solo (S_s) ou a seção vertical da estufa (S_v). T é a temperatura do componente analisado, com t sendo o tempo em segundos.

As equações das relações dos componentes da estufa no balanceamento de calor foram baseadas em Riahi et al. (2020), Ali et al. (2020), Al-Helal et al. (2015), e Laktionov et al. (2020). A Tabela 1 apresenta a definição das principais variáveis e em alguns casos, seus valores adotados.

Algumas variáveis possuem um subíndice separado por vírgula para indicar o tipo de interação e o tipo de troca de

calor. Antes da vírgula são representados os componentes da estufa, tais como, s para solo, c para cobertura e i para ambiente interno. Depois da vírgula é indicado o tipo de troca de calor, ou seja, c para convecção, a para absorção, e r para radiação.

Balanço de calor na cobertura: o balanço de calor na cobertura é definido a partir da relação entre as seguintes variáveis:

$$Q_{c,a} + Q_{cs,a} \Leftrightarrow Q_{co,c} + Q_{ci,c} + Q_{csky,r} + Q_{cs,r}$$

onde: $Q_{c,a}$ é o calor absorvido pela cobertura proveniente da radiação solar; $Q_{cs,a}$ é o calor absorvido pela cobertura proveniente da reflexão das ondas solares vinda do solo na estufa; $Q_{co,c}$ é a transferência de calor convectiva da cobertura para o ar externo (o); $Q_{ci,c}$ é a transferência de calor convectiva da cobertura para o ar interno; $Q_{csky,r}$ é a radiação solar transferida da cobertura para céu (sky); $Q_{cs,r}$ é a transferência de radiação de calor transferida da cobertura para o solo.

A partir do balanço de calor na cobertura, a taxa de variação da temperatura da cobertura é dada por:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{(Q_{c,a} + Q_{cs,a} - Q_{co,c} - Q_{ci,c} - Q_{csky,r} + Q_{cs,r})}{(Ca \times Da \times Sc)} \quad (2)$$

As trocas de calor são regidas pela seguintes equações:

$$Q_{c,a} = Rad \times S_c \times \alpha_c \quad (3)$$

$$Q_{cs,a} = Rad \times \tau_c \times \alpha_c \times \rho_s \times S_s \quad (4)$$

$$Q_{co,c} = h_{co,c} \times S_c \times (T_c - T_o) \quad (5)$$

$$Q_{ci,c} = h_{ci,c} \times S_c \times (T_c - T_i) \quad (6)$$

$$Q_{csky,r} = \sigma \times \epsilon_c \times S_c \times (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad (7)$$

$$Q_{cs,r} = S_s \times \sigma \times \alpha_t \times \epsilon_s \times T_s^4 \quad (8)$$

com T_c , T_s , T_i e T_o sendo as temperatura da cobertura, do solo, do ar interno e do ar externo, respectivamente. Os parâmetros $h_{co,c}$ e $h_{ci,c}$ são os coeficiente de transferência de calor convectivo entre a cobertura e o ambiente externo e a cobertura e o ambiente interno, respectivamente, definidos por (Kozai et al., 1979):

$$h_{co,c} = 5,7 + 3,8 \times V_w \quad (9)$$

$$h_{ci,c} = 1,52 \times (T_i - T_c)^{\frac{1}{3}} + 5,2 \times \left(\frac{R}{L \times S_v} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

Segundo Swinbank (1963), a temperatura do céu, T_{sky} (Equação 7), é dada por:

Tabela 1. Entradas do modelo.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor
Q	Quantidade de calor	W	-
Da	Densidade do ar	kgm^{-3}	1,127
Ca	Calor específico do ar	$jk g^{-1}K^{-1}$	1,012
Sc	Área da cobertura	m^2	44,34
Ss	Área do solo	m^2	14,1
Sv	Seção vertical da estufa	m^2	10
V	Volume da estufa	m^3	37,1
Rad	Radiação solar	Wm^{-2}	-
L	Comprimento da estufa	m	4
Vw	Velocidade do vento	ms^{-1}	-
R	Taxa da infiltração de ar	$m^3 s^{-1}$	1
σ	Constante de Boltzmann	$kg s^{-3}K^{-4}$	$5,67 \times 10^{-8}$
ρ_s	Reflexividade solar do solo	Adimensional	0,2
ϵ_s	Emissividade do solo	Adimensional	0,9
τ_c	Transmitância solar da cobertura	Adimensional	0,82
α_c	Absortividade solar da cobertura	Adimensional	0,25
α_t	Absortividade termal da cobertura	Adimensional	0,23
α_s	Absortividade solar do solo	Adimensional	0,45

$$T_{sky} = 0,0552 \times T_o^{\frac{3}{2}}. \quad (11)$$

Balanço de calor do solo: o balanço de calor no solo é obtido considerando as seguintes variáveis

$$Q_{cs,r} + Q_{s,a} \Leftrightarrow Q_{cs,a} + Q_{si,c} + Q_{s,r}$$

onde: $Q_{cs,r}$ é a transferência de calor através da radiação da cobertura para o solo; $Q_{s,a}$ é a absorção de calor pelo solo; $Q_{cs,a}$ é o calor absorvido pela cobertura proveniente da reflexão das ondas solares vinda do solo na estufa; $Q_{si,c}$ é a transferência convectiva de calor entre o solo e o ar interno; $Q_{s,r}$ é o calor em forma de radiação emitido pelo solo no total.

A partir do balanço de calor no solo, a taxa de variação da temperatura do solo é dada por:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Q_{cs,r} - Q_{cs,a} + Q_{s,a} - Q_{si,c} - Q_{s,r}}{C_a \times D_a \times S_s} \quad (12)$$

As trocas de calor envolvidas na equação do balanço de calor no solo são determinadas pelas Equações (13-17):

$$Q_{s,a} = Rad \times S_s \times \tau_c \times \alpha_c \quad (13)$$

$$Q_{cs,a} = Rad \times \tau_c \times \alpha_c \times \rho_s \times S_s \quad (14)$$

$$Q_{si,c} = h_{si,c} \times S_s \times (T_s - T_i) \quad (15)$$

$$Q_{s,r} = \epsilon_s \times \sigma \times S_s \times T_s^4 \quad (16)$$

$$Q_{cs,r} = \epsilon_c \times \sigma \times S_c \times \alpha_s \times T_s^4 \quad (17)$$

onde: $h_{si,c}$ é o coeficiente de transferência de calor convectivo entre o solo e o ambiente interno. Segundo Kozai et al. (1979), $h_{si,c}$ é estimado como:

$$h_{si,c} = 1,52 \times |T_i - T_s|^{1/3} + 5,2 \times \left(\frac{R}{L \times S_v} \right)^{1/2}. \quad (18)$$

Balanço de calor no ar interno: o balanço de calor no ar interno considera as seguintes variáveis:

$$Q_{ci,c} + Q_{si,c} \Leftrightarrow Q_{inf,c}$$

com $Q_{ci,c}$ sendo a troca de calor convectiva da cobertura para o ar interno; $Q_{si,c}$, a troca de calor convectiva do solo para o ar interno; e $Q_{inf,c}$, a perda de calor pela infiltração.

A taxa de variação da temperatura interna é dada por:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{ci,c} + Q_{si,c} - Q_{inf,c}}{C_a \times D_a \times V} \quad (19)$$

As trocas de calor envolvidas na equação do balanço de calor do ar interno são determinadas pelas Equações (20-22):

$$Q_{ci,c} = h_{ci,c} \times S_c \times (T_c - T_i), \quad (20)$$

$$Q_{si,c} = h_{si,c} \times S_s \times (T_s - T_i), \quad (21)$$

$$Q_{inf,c} = D_a \times C_a \times R \times (T_i - T_o). \quad (22)$$

3. SIMULAÇÃO DO MODELO DINÂMICO

Nesta seção são apresentadas as características da simulação do modelo dinâmico da estufa agrícola, utilizando o Matlab/Simulink®. As variáveis de entrada do modelo simulado são a radiação solar (em W/m^2), temperatura externa (em °C), e velocidade do vento (em m/s). Os valores dessas variáveis foram obtidos a partir da base de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), base A320 localizada em João Pessoa, Paraíba. O período considerado foi de 03/07/2021 a 07/07/2021, sendo os valores amostrados a cada hora.

De acordo com os dados apresentados na Figura 3, a velocidade do vento para o período analisado varia entre 0,3 e 3,0 m/s, enquanto que a radiação solar, apresentada na Figura 4, varia entre 0 e 800 W/m^2 . Como esperado, a radiação é igual a zero para horários de pouca ou nenhuma atividade solar, das 19:00 até às 05:00, e tem

seus maiores valores nos horários de maior intensidade solar, das 12:00 até às 13:00. A temperatura externa, no período considerado varia entre 21 e 29 °C dependendo principalmente da radiação solar, conforme apresentado na Figura 5.

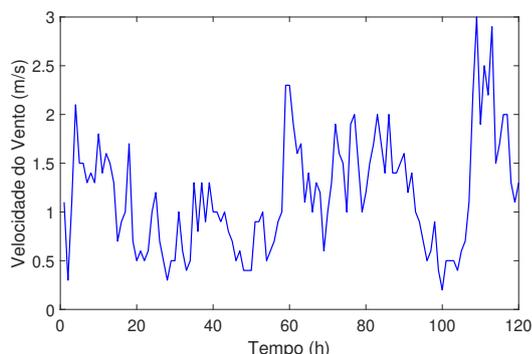


Figura 3. Curva da velocidade do vento entre os dias 03/07/2021 a 07/07/2021.

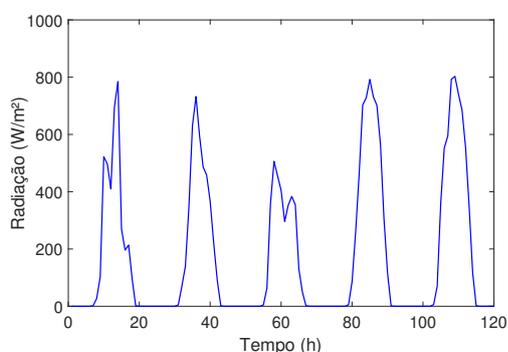


Figura 4. Curva da radiação solar entre os dias 03/07/2021 a 07/07/2021.

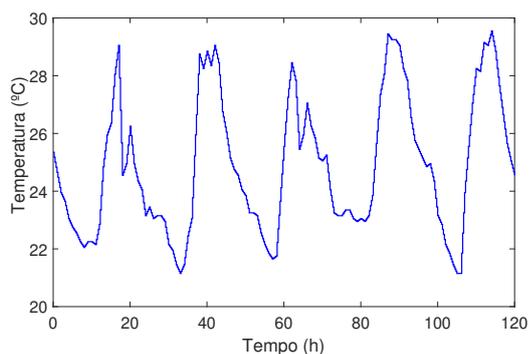


Figura 5. Curva da temperatura externa entre os dias 03/07/2021 a 07/07/2021.

Os parâmetros do sistema são escolhidos de acordo com os materiais que compõem a estufa, além do local utilizado para sua instalação. Os valores desses parâmetros foram baseados na criação de um sistema que pudesse reter o calor, com o dimensionamento indicado na Figura 6, baseada em uma estufa agrícola de porte médio.

A principal variável do modelo consiste na temperatura interna (T_i) da estufa agrícola, uma vez que o objetivo

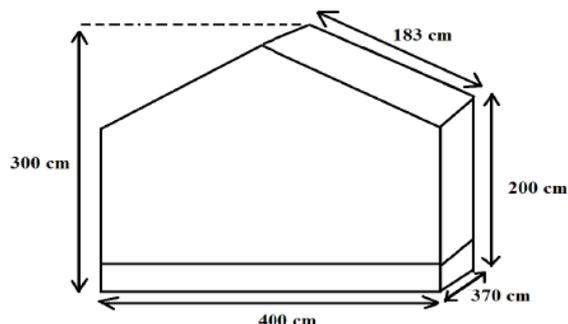


Figura 6. Dimensões da estufa agrícola utilizada para a simulação.

Fonte: Ali et al. (2015)

dos sistemas de controle é manter a temperatura ambiente da estufa dentro de uma faixa específica que maximize o crescimento dos cultivares.

Deve ser observado que os resultados dos cálculos são repassados para um bloco de integração. Assim, é obtido o valor da temperatura interna (T_i) em Kelvin. O valor inicial da temperatura interna é igual a 296 K, que também foi utilizado para a temperatura do solo e da cobertura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação do modelo dinâmico da estufa agrícola. Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas as curvas das temperaturas interna, da cobertura e do solo da estufa, respectivamente, comparadas à curva da temperatura externa ao redor da estufa.

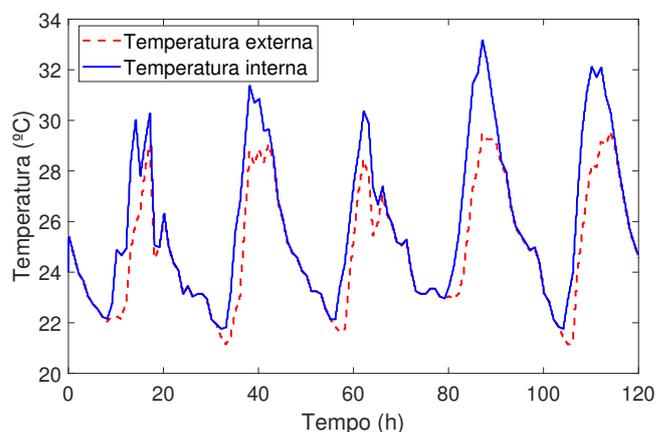


Figura 7. Curvas da temperatura interna e temperatura externa da estufa.

De acordo com a Figura 7, observa-se que a temperatura interna da estufa é mais elevada que a temperatura externa. Em contraste, quando ocorre uma redução da temperatura externa, a temperatura da estufa mantém um valor maior que a temperatura externa. Dessa forma, o modelo dinâmico apresenta o comportamento desejado para uma estufa agrícola, ou seja, elevar e manter a temperatura interna. Vale destacar que a temperatura interna depende diretamente dos materiais e das dimensões consideradas para sua construção, além do local de instalação. Além

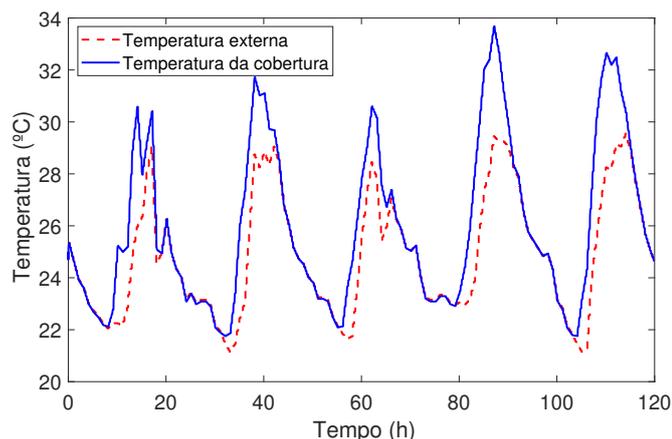


Figura 8. Curvas da temperatura da cobertura e temperatura externa da estufa.

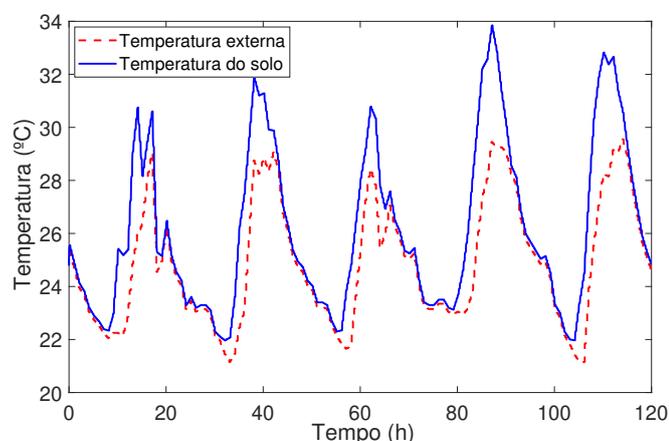


Figura 9. Curvas da temperatura do solo e temperatura externa da estufa.

disso, comparando os resultados obtidos com os trabalhos de Montoya-Ríos et al. (2020) e Riahi et al. (2020), observa-se que sempre é esperado uma retenção de calor na estufa, variando apenas a amplitude dessa retenção, a depender das características da estufa.

Um comportamento similar da variação da temperatura interna é observado para a temperatura da cobertura (Figura 8). Entretanto, para a temperatura da cobertura observam-se temperaturas mais elevadas devido ao contato direto da cobertura com a radiação solar. Pelo mesmo motivo, a temperatura da cobertura, em momentos de queda, é inferior a temperatura interna.

Com relação à temperatura do solo (Figura 9) é onde se tem a maior retenção de calor devido ao fato de não sofrer perdas diretamente para o ambiente. Deve ser observado que a temperatura do solo apresenta uma curva semelhante à temperatura externa, porém deslocada para cima.

O coeficiente de correlação da Pearson (r) é usado para avaliar o grau de correlação entre a temperatura externa e as temperaturas do solo, cobertura e interna. O coeficiente de Pearson varia entre -1 e 1 , com: -1 indicando uma correlação direta e negativa; 0 representando ausência de correlação; e 1 representando uma correlação direta e positiva dos dados. O coeficiente de correlação entre

as temperaturas externa e interna é igual a $0,9303$, indicando uma forte correlação entre essas duas variáveis como esperando. Resultados similares são obtidos para os coeficientes de correlação entre a temperatura externa e as temperaturas da cobertura e temperatura do solo, que ficaram com $0,9127$ e $0,9137$, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um modelo dinâmico de uma estufa agrícola com objetivo de obter o comportamento das temperaturas interna, da cobertura e do solo da estufa, comparando com a temperatura externa, esta obtida por meio de dados do INMET. O conhecimento da dinâmica de tais parâmetros pode ser extremamente útil para desenvolvimento de técnicas de controle. Apesar das simplificações consideradas, a partir dos resultados de simulação observa-se que o modelo dinâmico analisado apresenta comportamento esperado para uma estufa agrícola. Dessa forma, este modelo pode ser considerado para prever comportamentos de estufas em cenários práticos.

Em trabalhos futuros, pretende-se validar experimentalmente o modelo dinâmico apresentado e, em seguida, desenvolver estratégias de controle que consideram as diversas interações entre as variáveis do sistema.

REFERÊNCIAS

- Al-Helal, I., Waheeb, S., Ibrahim, A., Shady, M., and Abdel-Ghany, A. (2015). Modified thermal model to predict the natural ventilation of greenhouses. *Energy and Buildings*, 99, 1–8.
- Ali, R.B., Aridhi, E., and Mami, A. (2015). Dynamic model of an agricultural greenhouse using matlab-simulink environment. In *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 346–350. IEEE.
- Ali, R.B., Bouadila, S., and Mami, A. (2020). Experimental validation of the dynamic thermal behavior of two types of agricultural greenhouses in the mediterranean context. *Renewable Energy*, 147, 118–129.
- Bakker, J.C., Bot, G.P.A., Challa, H., and de Braak, N.J.V. (1995). *Greenhouse climate control: an integrated approach*. Wageningen Academic Publishers.
- Enoch, H. and Enoch, Y. (1999). The history and geography of the greenhouse. *Ecosystems of the World*, 1–16.
- FAO (2021). *Scientific review of the impact of climate change on plant pests*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). URL <https://www.fao.org/3/cb4769en/online/cb4769en.html>.
- Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G.A., Tignor, M.E., Wilson, S.B., and McMahan, M. (2010). Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: a web-based application. *Computers and electronics in agriculture*, 70(1), 105–116.
- IPCC (2022). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2022*. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). URL <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- Jadhav, H. and Rosentrater, K. (2017). Economic and environmental analysis of greenhouse crop production with special reference to low cost greenhouses: a review.

- In *2017 ASABE Annual International Meeting*, 1. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kozai, T., Sase, S., and Nara, M. (1979). A modelling approach to greenhouse ventilation control. In *Symposium on Computers in Greenhouse Climate Control 106*, 125–136.
- Labidi, A., Chouchaine, A., and Mami, A.K. (2017). Control of relative humidity inside an agricultural greenhouse. In *2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 109–114. IEEE.
- Laktionov, I.S., Vovna, O.V., Kabanets, M.M., Derzhetska, M.A., and Zori, A.A. (2020). Mathematical model of measuring monitoring and temperature control of growing vegetables in greenhouses. *International Informattion and Engineering Technology Association - IIETA*, 15(3), 325–336.
- Montoya-Ríos, A.P., García-Mañas, F., Guzmán, J.L., and Rodríguez, F. (2020). Simple tuning rules for feed-forward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. *Agro-nomy*, 10(9), 1327.
- Reséndez, A.M., Durón, J.A., and González, A.L. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29, 763–774.
- Riahi, J., Vergura, S., Mezghani, D., and Mami, A. (2020). Intelligent control of the microclimate of an agricultural greenhouse powered by a supporting pv system. *Applied Sciences*, 10(4), 1350.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J.L., and Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and control of greenhouse crop growth*. Springer.
- Sanchez-Molina, J.A., Ming, L., Rodriguez, F., Guzman, J.L., Hui, W., and Xinting, Y. (2017). Development and test verification of air temperature model for chinese solar and spanish almeria-type greenhouses. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4), 66–76.
- Swinbank, W.C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339–348.
- Yildiz, I. (2021). *Greenhouse engineering: integrated energy management*. CRC Press.