

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
CAMPUS ARARANGUÁ**

MARCELO CAVALCANTE DOS SANTOS

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES DAS VARIÁVEIS
AMBIENTAIS DE UMA ESTUFA AGRÍCOLA**

ARARANGUÁ


2017

MARCELO CAVALCANTE DOS SANTOS


**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

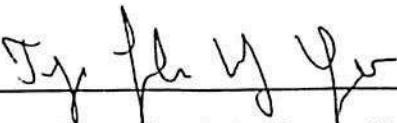
Aprovado em: 05/12/2017



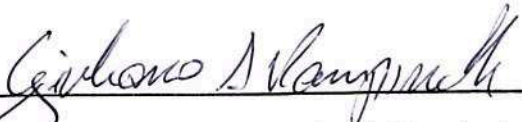
Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Orientador)



Prof. Dr. Thiago Dutra (Coorientador)



Prof. Dr. Tiago Jackson May Dezuo (Examinador)



Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (Examinador)

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DE UMA ESTUFA AGRÍCOLA

Marcelo Cavalcante dos Santos¹

RESUMO

Ao longo da história, as variações do clima sempre trouxeram mudanças na forma como a humanidade maneja a sua produção de alimentos. O cultivo protegido é considerado como uma das formas mais sofisticadas de produção atualmente, pelo fato de criar condições favoráveis para que as plantas possam desenvolver todo seu potencial genético. O presente trabalho tem por objetivo analisar um modelo matemático que descreve o comportamento térmico de uma estufa agrícola, bem como projetar e avaliar técnicas de controle que possibilitem um melhor manejo no uso dos recursos naturais. Diferentes cenários referentes às condições ambientais foram avaliados através do modelo matemático, permitindo propor estratégias de controle adequadas de acordo com as necessidades específicas de cada cultura. As técnicas de controle avaliadas apresentaram bons resultados, indicando que as mesmas são adequadas para este tipo de sistema térmico. As pesquisas relacionadas a este tema tornam-se fundamentais para que novas tecnologias sejam desenvolvidas, permitindo um aperfeiçoamento nas técnicas de produção em cultivo protegido.

Palavras-chave: Modelo térmico. Controle de sistemas. Estufas agrícolas. Recursos naturais.

¹ Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: marcelo.ene@gmail.com

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF CONTROLLERS OF THE ENVIRONMENTAL VARIABLES OF AN AGRICULTURAL GREENHOUSE

ABSTRACT

Throughout history, climate variations have always brought changes in the way that mankind manages the food production. Protected cultivation is considered one of the most sophisticated forms of production today, because it creates favorable conditions for plants to develop their full genetic potential. The present work aims to analyze the mathematical model that describes the thermal behavior of an agricultural greenhouse, as well as to design and evaluate control techniques that allow a better management in the use of natural resources. Several climate condition scenarios are evaluated using the equations of the mathematical model, allowing to propose adequate control strategies according to the needs of each crop. The control techniques evaluated presented good results, indicating that they are suitable for this type of thermal system. The research related to this topic becomes essential for the development of new technologies, allowing an improvement in the techniques of production in greenhouses.

Keywords: Thermal model. Control systems. Agricultural greenhouses. Natural resources.

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros da utilização de estufas remontam ao Império Romano, durante o reinado do imperador Tibério César, onde eram cultivados pepinos. Durante o período do Renascimento, principalmente na Inglaterra, França e Holanda, agricultores já faziam o uso de estruturas rudimentares de bambu para proteger suas plantações. Já no século XIX, melões, uvas e morangos já eram cultivados em ambientes protegidos (CASTILLA, 2013).

Rapidamente o uso de estufas se espalhou pela Europa, América e Ásia, aparecendo em regiões em torno das grandes cidades. No século XX, o desenvolvimento econômico depois da Segunda Guerra Mundial impulsionou a construção de estufas. Mas foi o surgimento do filme plástico que facilitou a expansão, principalmente na Ásia e nos países ao redor do Mediterrâneo (CASTILLA, 2013).

A característica que distingue o cultivo ao ar livre de uma produção em estufas, também conhecida como cultivo protegido, é o fato de que existe uma barreira entre a cultura e o meio externo. Esta barreira cria um microclima que protege do vento, das chuvas, das pragas e ervas daninhas, propiciando condições favoráveis de desenvolvimento para as plantas e permitindo ao produtor um maior controle do ambiente interno (BAKKER et al., 1995).

O principal objetivo de se produzir em um ambiente protegido foi sintetizado por Albright et al. (2001), concluindo que a produção em ambientes fechados se esforça de tal forma para que as plantas possam desenvolver todo seu potencial genético. Sendo assim, este tipo de sistema pode ser considerado a forma mais intensiva e sofisticada de produção agrícola.

Nas últimas décadas, o cultivo de hortaliças em ambiente protegido, especialmente em estufas, criou a possibilidade de ajustar o ambiente à planta e estender a produção de algumas espécies ao longo do ano, mesmo em regiões inaptas à agricultura (ANDRIOLO, 2011). A utilização de ambientes protegidos para produção de alimentos já é bastante utilizada em países do hemisfério norte, onde a necessidade de produzir hortaliças em invernos rigorosos fez com que a pesquisa e desenvolvimento por novas tecnologias alavancassem estas técnicas de cultivo.

Atualmente o controle climático das estufas é considerado um fator muito importante, pois permite manter um clima favorável independentemente das condições externas (RODRÍGUEZ et al., 2015). As técnicas de controle avançadas, o aumento da flexibilidade de

algoritmos mais complexos e o uso de dispositivos eletrônicos robustos possibilitam que as decisões estratégicas sejam tomadas após uma análise de todos os componentes envolvidos no processo, maximizando a eficiência e reduzindo os riscos e os custos de produção (ANDRIOLO, 2011).

Bennis et al. (2008), enfatiza que a dificuldade em manter as condições internas ideais, está na complexidade dos fenômenos envolvidos e que estão estritamente relacionados com os ciclos diários, o estágio de desenvolvimento, o clima local e a natureza de cada cultura. Deste modo, um sistema de cultivo protegido pode ser considerado como um sistema não-linear, multivariável e dinâmico.

A partir desse pressuposto, o presente trabalho se propõe a realizar a análise do modelo matemático que descreve o comportamento físico de uma estufa agrícola e, através da simulação de diferentes cenários para manutenção do microclima interno, projetar e avaliar o desempenho de técnicas de controle que possam minimizar o uso de recursos naturais, como água e energia elétrica, pelo sistema.

Em decorrência do número reduzido de trabalhos nesta área no Brasil e do pouco aproveitamento destas técnicas de produção agrícola, o presente trabalho torna-se relevante no âmbito da agricultura atual. Sendo assim, o desenvolvimento deste trabalho contribui para que novos estudos e novas tecnologias sejam pesquisadas, contribuindo para o aperfeiçoamento destas técnicas de produção em cultivo protegido.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: os conceitos pertinentes ao tema são apresentados no referencial teórico da Seção 2. A metodologia é explicada na Seção 3. Os resultados obtidos e a discussão dos mesmos estão presentes na Seção 4. Por fim, as conclusões e a perspectiva de trabalhos futuros são descritas na Seção 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são descritos os conceitos pertinentes a este trabalho, abordando aspectos referentes às características típicas de estufas agrícolas e os dispositivos de climatização e controle para este tipo de sistema.

2.1 Características de uma estufa agrícola

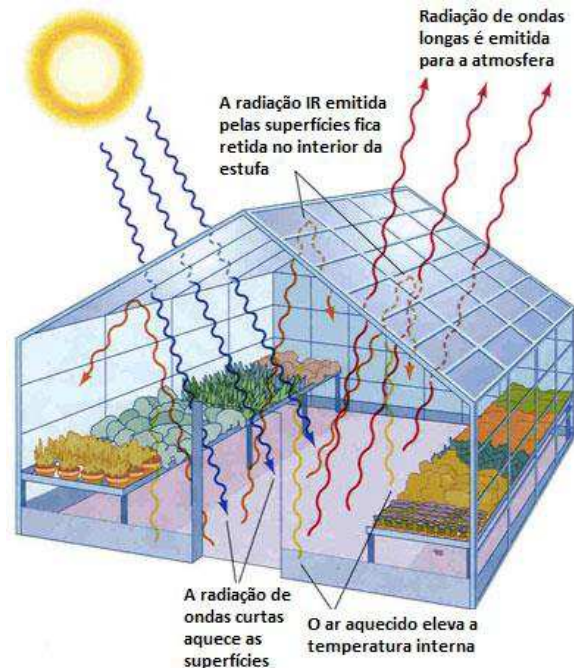
O cultivo protegido é baseado no fenômeno chamado “efeito estufa”, no qual a radiação solar global é interceptada pela estrutura da estufa. Este efeito, em grande parte, é causado devido ao material utilizado na cobertura ser transparente para esta radiação. Dessa forma, as plantas, o solo e outras superfícies internas absorvem praticamente todos os comprimentos de onda, aquecendo-se e emitindo energia, na sua maioria na forma de radiação infravermelha de ondas longas (CASTILLA, 2013).

Esta energia emitida pelos elementos internos da estrutura, que foram expostos à radiação solar, é interceptada pelo material da cobertura, que é opaco a radiação de ondas longas. O material aquece e reemite esta energia na mesma proporção para o interior da estufa. O ar aquecido eleva a temperatura interna ao longo do dia, este aumento pode variar de acordo com o tipo de material e estrutura utilizados (CASTILLA, 2013). Este processo está representado na Figura 1.

A radiação de ondas curtas compõem grande parte do espectro da luz visível e é o principal elemento para o desenvolvimento das plantas, onde reações químicas transformam a energia solar em energia química, através do processo de fotossíntese. No entanto, há um compromisso a ser atendido entre a quantidade de luz admitida pela estufa e a quantidade de calor requerida para a manutenção do clima interno (MCCULLAGH, 1978).

Esta dinâmica por trás do microclima de uma estufa é uma combinação de processos físicos envolvendo transferência de energia (radiação e calor) e um balanço de massa (vapor d'água e fluxos de gases) (BAKKER et al., 1995). A temperatura possui um papel importante no crescimento das plantas, necessitando se manter em uma faixa adequada dependendo do tipo de cultura e o estágio do desenvolvimento. Já a transpiração das plantas, que possui um papel de resfriar e transportar nutrientes de um extremo a outro da planta, é afetada diretamente pela umidade relativa do ambiente (JONES, 2014).

Figura 1 – Processo de absorção da radiação solar pela estrutura da estufa. Fonte: Google Images.

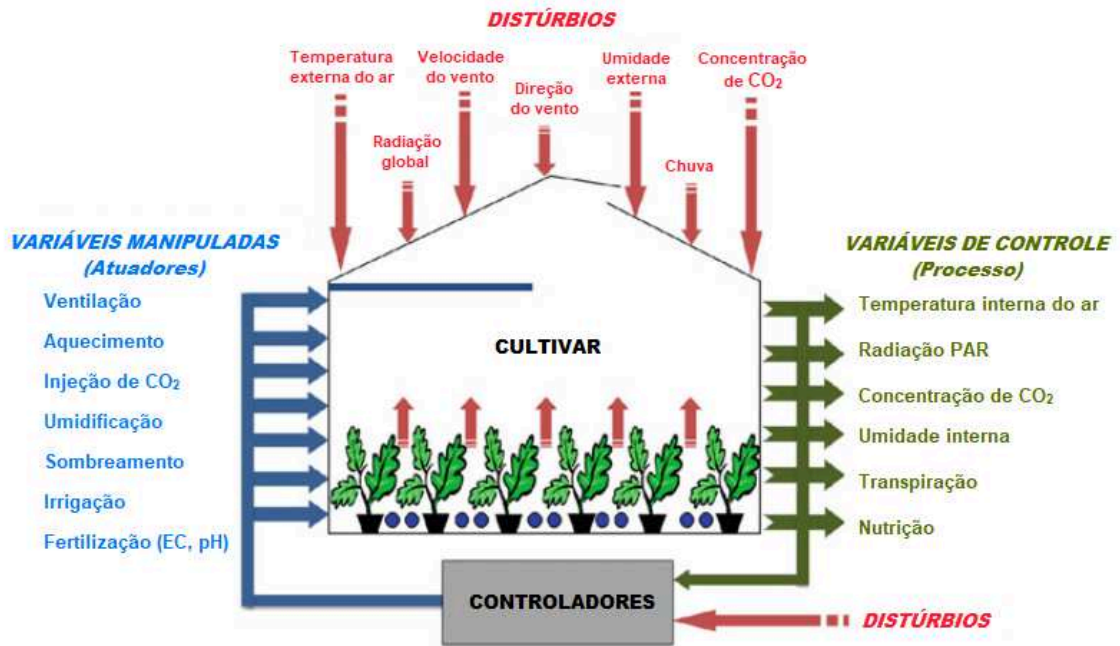


A complexidade de um sistema de produção em estufas, com diferentes processos simultâneos (físicos, químicos, biológicos) e em diferentes escalas de tempo e padrões, tornam difíceis a busca por soluções ótimas. Sendo assim, as variáveis de controle do processo são altamente dependentes da manipulação dos atuadores, que por sua vez sofrem com os distúrbios das variáveis climáticas externas (RODRÍGUEZ et al., 2015). Na Figura 2, são apresentadas diversas variáveis envolvidas no sistema de uma estufa.

É fato que a temperatura e umidade estão fortemente acopladas devidos às relações das leis da termodinâmica e os atuadores são geralmente sujeitos a variações que muitas vezes não são tratadas explicitamente para providenciar um sistema de controle robusto e eficiente (RODRÍGUEZ et al., 2015).

Os diversos elementos que compõem uma estufa e as relações múltiplas estabelecidas no seu interior fazem dela um sistema integrado, no qual os fluxos de energia e informação são dinâmicos e de diferentes magnitudes. A cultura ali presente é seu principal elemento, pois é afetada por diferentes variáveis, como as condições climáticas, biótica e de manejo do ambiente. Todas estas combinações possíveis interagem entre si, elevando o nível de complexidade dos diversos subsistemas, podendo alterar de forma significativa seu ciclo de desenvolvimento (RODRÍGUEZ et al., 2015).

Figura 2 – Panorama das variáveis envolvidas no sistema de uma estufa (Adaptado de RODRÍGUEZ et al., 2015).



2.2 Propriedades construtivas

Dependendo do clima local e das condições requeridas para a espécie a ser cultivada, algumas configurações para a construção do ambiente protegido podem ser utilizadas. Em relação à estrutura, existem algumas que são preferencialmente aceitas, pois já são utilizadas em larga escala e possuem padrões em relação ao formato, altura e comprimento (CASTILLA, 2013). Em estruturas passivas, é comum utilizar aberturas superiores para facilitar o escoamento do ar, contribuindo para a diminuição da temperatura interna (REIS, 2005), como pode ser visto na Figura 3. Na Figura 4, são apresentadas outras configurações.

Figura 3 – Tipos de estruturas com teto convectivo em formato curvilíneo e retilíneo, respectivamente.

(Adaptado de REIS, 2005).



Figura 4 – Estufas em formato de arco e formato capela, respectivamente. (Adaptado de REIS, 2005).



Outra questão importante é a transmissividade do material da cobertura, pelo fato de que a luz visível é o fator fundamental para as atividades fotossintéticas das plantas. O desenvolvimento das espécies depende diretamente da quantidade de luz disponível. Essa quantidade de luz é função de fatores como: tipo do material, número de camadas, sombreamento, orientação solar, radiação solar direta e difusa, entre outras características geográficas (VON ZABELTITZ, 2011).

Como já foi mencionado, o material utilizado na cobertura afeta diretamente o desenvolvimento das plantas e a escolha adequada depende da cultura que será produzida, levando em consideração a espessura e a transmissividade da radiação solar, para que se aproveite o máximo da energia disponível. Os materiais mais utilizados são: vidro, acrílicos, filmes plásticos de PVC (Cloro de Polivinila), PE (Polietileno), EVA (Etileno Acetato de Vinilla), ETFE (Etileno Tetrafluoretileno), entre outros (VON ZABELTITZ, 2011).

Os filmes plásticos são os materiais mais utilizados para cobertura de estruturas em países de regiões tropicais, subtropicais e áridas. O filme plástico de baixa densidade é um dos mais baratos e mais utilizados, mas possui uma vida útil limitada, precisando ser trocado periodicamente. Com o tempo, o estado do material pode influenciar na passagem da radiação solar pela cobertura. Alguns materiais já possuem aditivos químicos que evitam a formação de gotículas e o acúmulo de poeira sobre a superfície do material. Mesmo assim, uma manutenção periódica se faz necessária (CASTILLA, 2013).

Na Tabela 1 são apresentados alguns tipos de materiais com a relação de sua transmissividade para as diferentes componentes da radiação solar global.

Tabela 1 – Relação da transmissividade com as componentes da radiação solar para diferentes materiais.

Material	Espessura [mm]	Componente Direta [%]	Componente Difusa [%]
Vidro	4	89 – 91	82
Filme PE	0,1 – 0,2	89 – 91	81
Filme EVA	0,18	90 – 91	82
Filme ETFE	0,1	93 – 95	85

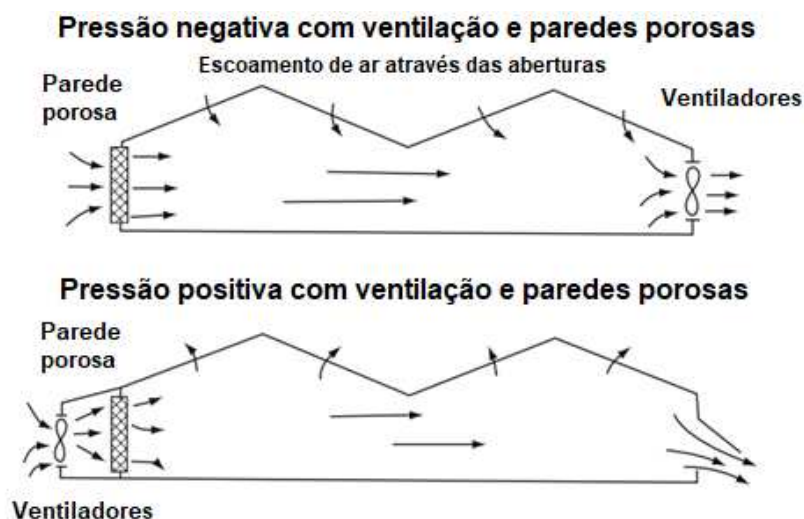
Fonte: Adaptado de VON ZABELTITZ (2011)

2.3 Dispositivos de climatização

Com o aumento da temperatura interna, é necessário que a absorção de energia no ambiente seja atenuada e seu excesso seja removido. Na prática, a redução da radiação solar utilizando sistemas de sombreamento e o uso de sistemas de ventilação capazes de transportar essa energia térmica para o exterior, podem colaborar com o conforto interno. Sistemas utilizando ventilação natural ou forçada, técnicas de resfriamento evaporativo, como sistemas de nebulização (*fog systems*) ou paredes porosas (*fan and pad systems*), são os tipos mais comuns (CASTILLA, 2013).

A ventilação mecânica é utilizada quando se deseja injetar ou extrair uma quantidade elevada de ar da estufa, permitindo uma renovação da atmosfera interna ao longo do dia. Ventiladores instalados em lados opostos da estufa são auxiliados por paredes porosas úmidas que atuam no resfriamento do ambiente interior. Uma diferença de pressão é gerada, dependendo do tipo de sistema, como pode ser visto na Figura 5 (VON ZABELTITZ, 2011).

Figura 5 – Arranjo de sistemas de ventilação utilizando paredes porosas (Adaptado de VON ZABELTITZ, 2011).



Outra alternativa é a utilização da ventilação natural como recurso para auxiliar no controle da temperatura interna. As porções de ar mais aquecidas no interior da estufa tendem a se localizar na parte superior da estrutura. A exaustão do ar quente é facilitada pelas aberturas localizadas próximas a esta região (BOULARD; BAILLE, 1993).

A utilização do resfriamento evaporativo, utilizando sistemas de nebulização (*fog systems*), possui elevada eficiência em regiões de clima quente e seco. Este tipo de sistema atua injetando gotículas de água no meio, o que promove um aumento da umidade relativa. Tais gotículas de água evaporam às custas da absorção de calor do meio (processo endotérmico), provocando a redução da temperatura ambiente (CASTILLA, 2013). Na prática, a eficiência deste tipo de sistema depende diretamente da umidade relativa, que não pode ser maior que 50 %.

A localização dos *nozzles* (bicos injetores de água) do sistema de nebulização precisa ser levada em consideração no projeto, para que a gotícula de água injetada pelo sistema tenha tempo o suficiente de absorver a energia necessária para sua evaporação. Do contrário, se o sistema estiver instalado muito próximo às plantas, esta umidade excessiva irá se acumular na área foliar e nos frutos, elevando o risco de aparecimento de doenças fúngicas (JONES, 2014).

2.4 Técnicas de controle

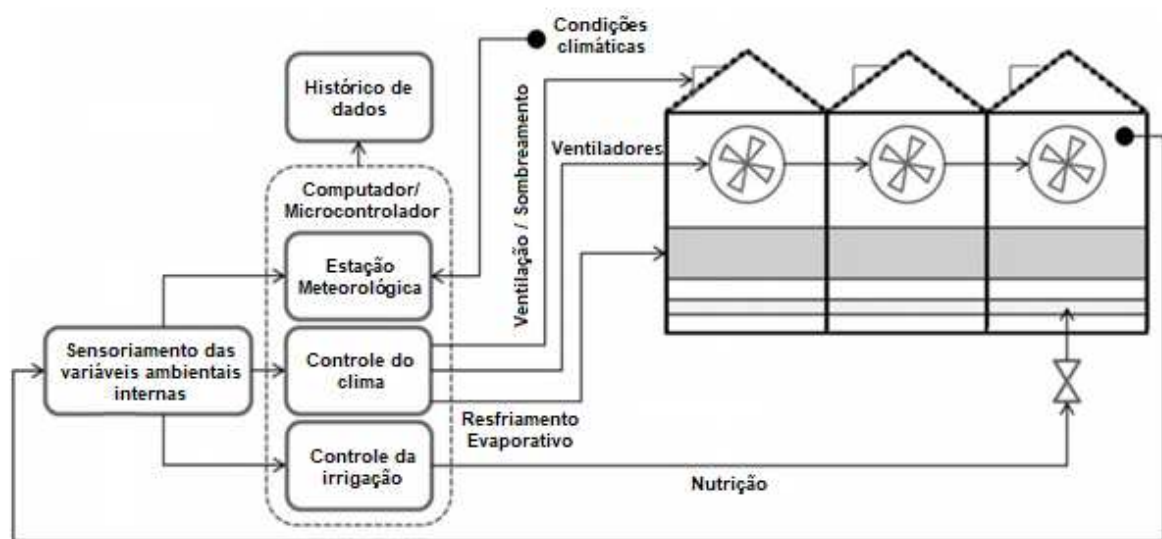
A utilização de dispositivos eletrônicos capazes de realizar um sensoriamento e um controle adequado para cada tipo de cultura é fundamental, pois permite a análise de dados com rapidez, eficiência e precisão. Com isso, podem-se prever determinadas situações, se antecipando a eventuais problemas e podendo atuar de forma localizada nas necessidades específicas de cada cultura (PONCE et al., 2014).

Com o avanço da tecnologia, dispositivos de *hardware* podem processar um maior volume de informações. Estes avanços, fizeram com que o *software* também evoluísse da mesma forma. Assim, sofisticadas estratégias de controle utilizando técnicas de inteligência artificial estão começando a ser utilizadas para monitorar e controlar o microclima de estufas (PONCE et al., 2014).

Um sistema de controle é composto, basicamente, por sensores que fazem a medição das variáveis desejadas, enviando estas informações para os controladores, que ainda podem

ser subdivididos em controle ambiental e de irrigação, por exemplo. Juntamente com dados climáticos de uma estação meteorológica, as decisões a serem tomadas são enviadas para os atuadores, que tem por objetivo efetuar determinada ação para que os requisitos do projeto sejam atendidos (PONCE et al., 2014). Este tipo de configuração e os principais componentes de um sistema automatizado para estufas agrícolas são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama típico de controle e automação utilizados em estufas (Adaptado de PONCE et al., 2014).



O microclima de uma estufa é um processo complexo e que pode ser descrito matematicamente por um conjunto de equações não lineares. O fato de possuir múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multi-input Multi-output – MIMO*), além dos distúrbios, aqui considerados como as variações climáticas externas, faz com que seja necessário o desenvolvimento de técnicas de controle mais complexas, visando um desempenho adequado do sistema (CASTILLA, 2013).

Muitos pesquisadores têm concentrado esforços em encontrar soluções para o controle de estufas agrícolas. Diversas estratégias e técnicas de controle vêm sendo propostas, desde as baseadas na teoria do controle clássico, como: Proporcional, Integral e Derivativo (PID), até técnicas mais avançadas como preditiva, adaptativa, robusta, controle não-linear e ainda inteligência artificial, como lógica *Fuzzy* e redes neurais (DUARTE-GALVAN et al., 2012).

Como exemplo de trabalhos já publicados sobre o tema, é possível citar Gurban e Andreescu (2013), que utilizam uma estrutura de controle PID com ajuste dos ganhos do controlador com base no método de Ziegler-Nichols. Os resultados obtidos demonstraram

não apenas uma melhoria nas respostas do sistema em relação as mudanças de *setpoint*, mas também na estimação de parâmetros ou distúrbios. Neste caso, como o controle PID é aplicado para sistemas lineares, os autores utilizam o método de *feedback/feedforward* para linearização do sistema e o desacoplamento entre as equações não lineares.

A Tabela 2 apresenta um resumo de outros trabalhos já publicados sobre desenvolvimento de estratégias de controle para estufas agrícolas.

Tabela 2 – Diferentes abordagens em controle do microclima em estufas.

Variáveis de controle	Variáveis do processo	Técnicas de controle	Referências
Temperatura, Umidade	Ventilação natural, umidificadores	Controle Preditivo Multivariável (MPC)	Senent et al (1998)
Temperatura, Umidade	Aquecimento, <i>fog system</i> , ventilação natural	Controle Preditivo Multivariável não linear	Gruber et al (2009)
Temperatura, Umidade, CO ₂	Aquecimento, <i>fog system</i> , ventilação	<i>Backstepping</i>	Belhani, Sirdi (2009)
Temperatura, Umidade	Aquecimento, <i>fog system</i> , ventilação	Filtro Kalman	Hameed (2010)
Temperatura, Umidade	Aquecimento, ventilação natural	PID	Gurban, Andreescu (2013)
Temperatura, Umidade	Aquecimento, ventilação natural, sombreamento, <i>fog system</i>	<i>Model Free Control</i>	Lafont et al (2013)
Temperatura, Umidade	Aquecimento, ventilação natural, umidificadores	Lógica Fuzzy	Lafont, Balmat (2002)

Fonte: Adaptado de RODRÍGUEZ et al. (2015)

3 METODOLOGIA

Uma ferramenta importante para alcançar a eficiência energética em uma estufa é realizar uma modelagem matemática que descreva todo o comportamento do sistema, a fim de avaliar o potencial técnico de uma ampla variedade de conceitos de projeto, bem como analisar a relação custo benefício. Uma estratégia comumente adotada para modelagem matemática de uma estufa consiste em aplicar as equações da conservação da massa e da energia no ambiente delimitado pela estrutura (VADIEE; MARTIN, 2012).

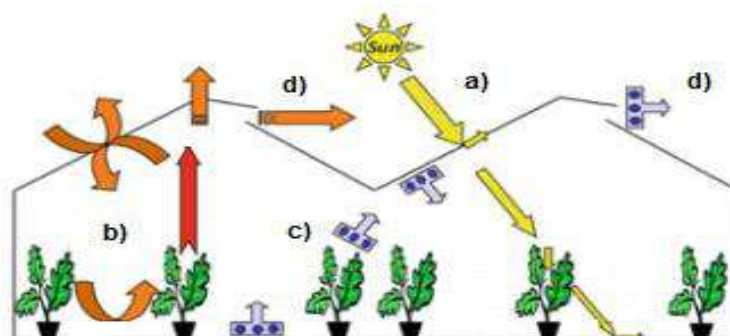
Através da modelagem matemática do problema físico, é possível propor estratégias de controle de variáveis importantes e, simultaneamente, atender às leis de conservação da massa e da energia na estufa. Alguns dos parâmetros que definem as condições climáticas externas, que correspondem aos distúrbios, podem ser subitamente alterados. Com isso, pretende-se projetar um sistema de controle que atenua os efeitos causados pelos distúrbios, possibilitando um funcionamento mais robusto da estufa.

As etapas a serem executadas no presente trabalho serão descritas a seguir.

3.1 Análise do modelo matemático de uma estufa agrícola

O microclima de uma estufa é função das interações entre planta, solo, material da cobertura e condições climáticas externas. Na Figura 7 são apresentados alguns processos presentes no cultivo protegido, sendo que a condição ambiental da estufa depende da radiação solar (a), da troca de calor através das paredes e do solo (b), da transferência de calor associada aos fenômenos de respiração e transpiração da planta (c) e do fluxo líquido advectivo de energia e massa transportados através das aberturas (d) (CHEN et al., 2015).

Figura 7 – Principais processos que ocorrem em uma estufa (Adaptado de RODRÍGUEZ et al., 2015)



Os principais parâmetros que devem ser controlados para o cultivo de uma planta são a temperatura e a umidade relativa do meio. Assim, o modelo matemático deve ser representado por equações que compreendam tais parâmetros. Além disso, o modelo deve ser dinâmico, possibilitando analisar o efeito instantâneo sobre o sistema proveniente de um distúrbio súbito e de uma consequente atuação de um controlador a fim de manter o microclima desejado (ALBRIGHT et al., 2001).

A fim de atender essas necessidades, adotou-se neste trabalho um modelo matemático baseado nas equações apresentadas em Albright et al. (2001). O modelo segue uma formulação integral e transiente das equações da conservação da energia, representada na Equação (1), e da umidade absoluta, representada pela Equação (2), aplicadas em um volume de controle que engloba a estrutura da estufa:

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho C_p V} [A_s S_i(t) - \lambda q_{fog}(t)] - \frac{V_R}{V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] - \frac{UA}{\rho C_p V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (1)$$

$$\frac{dw_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V} [q_{fog}(t)] + \frac{1}{\rho V} [E(S_i(t), w_{in}(t))] - \frac{V_R}{V} [w_{in}(t) - w_{out}(t)] \quad (2)$$

onde T_{in} é a temperatura do ar interno em (K), T_{out} é a temperatura do ar externo em (K), V é o volume da estufa em (m^3), ρ é a densidade do ar ($kg.m^{-3}$), UA é o coeficiente de transferência de calor em ($W.K^{-1}$), C_p é o calor específico do ar ($J.(kg.K)^{-1}$), S_i é a radiação solar interceptada pela estrutura em ($W.m^{-2}$), A_s é a área superficial da estrutura (m^2), q_{fog} é a vazão mássica de água injetada na estufa pelo sistema de nebulização (*fog system*) em ($gH_2O.s^{-1}$), λ é o calor latente de vaporização da água ($J.g^{-1}$), V_R é a vazão volumétrica de ar promovida pelo sistema de ventilação em ($m^3.s^{-1}$), w_{in} e w_{out} são as umidades absolutas internas e externas em ($gH_2O.kg^{-1}ar$) e $E(S_i(t), w_{in}(t))$ é a taxa de evapotranspiração das plantas em ($gH_2O.s^{-1}$).

Na Equação (2), $E(S_i(t), w_{in}(t))$ representa a taxa de evapotranspiração das plantas. Uma aproximação para essa taxa é apresentada na Equação (3), onde α é um coeficiente global que contempla o sombreamento e o índice de área foliar (*LAI*), β_t é um coeficiente global que contém as constantes termodinâmicas e outros fatores que afetam a evapotranspiração (ALBRIGHT et al., 2001).

$$E(S_i(t), w_{in}(t)) = \frac{\alpha S_i(t)}{\lambda} - \beta_t w_{in}(t) \quad (3)$$

Deve ser mencionado que V , corresponde a um volume efetivo da mistura ar-vapor d'água e não ao volume geométrico. É comum a existência de zonas de estagnação de ar neste tipo de ambiente, de modo que o volume efetivo é significativamente menor que o volume geométrico. Em geral, o volume efetivo é da ordem de 60 a 70% do volume geométrico (PASGIANOS et al., 2003). Neste trabalho, foi adotado o valor de 65%.

A composição dessa mistura pode ser descrita pela umidade (w), também chamada de umidade absoluta, definida como a razão entre a massa de vapor d'água (m_v) e a massa de ar seco (m_a). Considerando que ar e vapor d'água podem ser modelados como gases ideais, onde M é o peso molecular e p as pressões parciais de ar e vapor, a Equação (4) representa estas relações (MORAN et al., 2005):

$$w = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a} \quad (4)$$

sendo que a pressão do ambiente é a soma das pressões parciais do ar seco e vapor d'água, $p = p_a + p_v$, e a razão do peso molecular da água para o ar seco é aproximadamente 0,622. A composição do ar úmido também pode ser representada pela umidade relativa, $\phi = \frac{p_v}{p_{ws}}$, onde p_v é a pressão do vapor em (kPa) e p_{ws} é a pressão de saturação da água na temperatura da mistura em (kPa). Logo, se a pressão de vapor atingir a pressão de saturação na mesma temperatura, atinge-se a $\phi = 1$ e diz que a mistura está saturada. Nessa situação, a umidade absoluta no meio é máxima. A relação entre umidades absoluta e relativa é dada pela Equação (5), em que p_{atm} é a pressão atmosférica em (kPa) (MORAN et al., 2005).

$$w = f(T, \phi, p) = \frac{0,622 p_{ws}(T) \phi}{p_{atm} - p_{ws}(T) \phi} \quad (5)$$

Para uma melhor representação, os valores das variáveis de controle foram normalizados, sendo que V_R^* e q_{fog}^* são valores percentuais relativos as capacidades máximas dos equipamentos. Na Equação (6) é apresentada essa normalização, onde V_R^{max} é

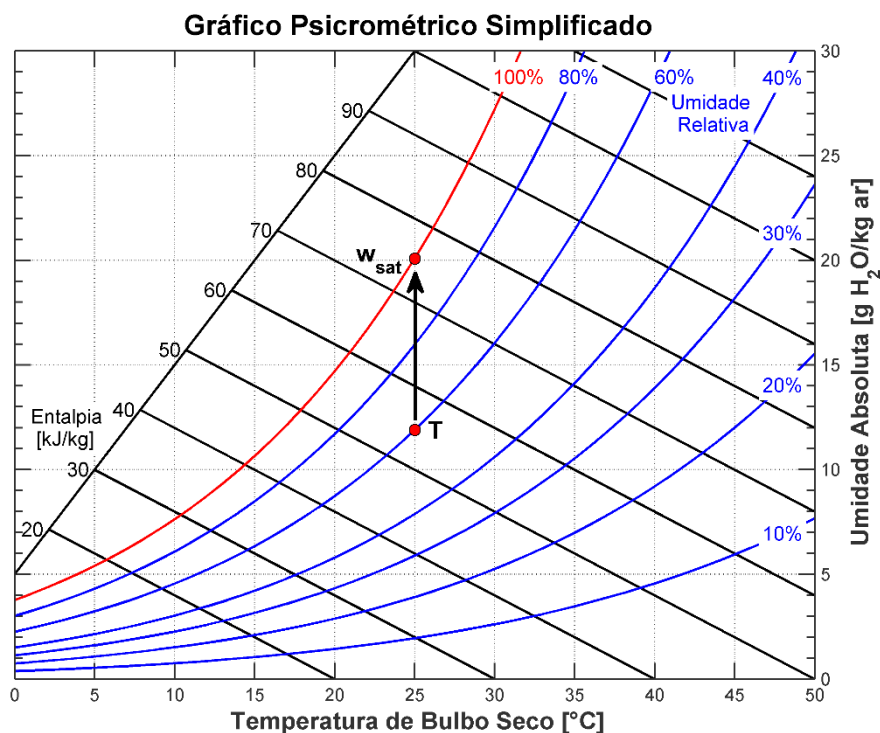
a vazão volumétrica máxima fornecida pelo sistema de ventilação e q_{fog}^{max} é a vazão mássica máxima disponibilizada pelo sistema de nebulização (*fog system*).

$$V_R = u_1 \cdot V_R^{max} \quad q_{fog} = u_2 \cdot q_{fog}^{max} \quad (6)$$

Uma questão que deve ser considerada ao definir a temperatura e umidade ótima para determinada cultura está relacionada com a restrição das leis psicrométricas. Ao considerar uma temperatura (T), deve-se verificar a umidade absoluta máxima na Equação (5), considerando a umidade relativa igual a 100%. O gráfico psicrométrico mostra a relação da umidade relativa, umidade absoluta, entalpia, temperatura de bulbo seco, entre outras variáveis. A Figura 8 apresenta um gráfico psicrométrico simplificado, com a umidade de saturação (w_{sat}) para uma determinada temperatura (T) (MORAN et al., 2005).

É de suma importância observar estas restrições psicrométricas, uma vez que temperatura e umidade são estritamente relacionadas. Isto pode evitar, por exemplo, a ocorrência do ponto de orvalho, que provocaria a condensação parcial do vapor d'água na cobertura e nas laterais da estrutura, em decorrência, geralmente, de uma redução significativa de temperatura (MORAN et al., 2005).

Figura 8 – Gráfico psicrométrico simplificado com a relação de algumas variáveis (Fonte: do Autor).



3.2 Linearização do modelo da estufa

Conforme visto anteriormente, as equações que descrevem o modelo matemático da estufa são não lineares. Com base nesse aspecto, uma possibilidade para o projeto das estratégias de controle consiste em utilizar técnicas não lineares, como por exemplo a linearização *feedback/feedforward* vista para o caso de estufas em Albright et al. (2001). Nesse trabalho, será proposta uma alternativa que consiste em projetar técnicas de controle utilizando o modelo linearizado da estufa.

Geralmente em sistemas de controle deseja-se uma situação em regime permanente, que o sistema apresente todas as variáveis de estado constantes. Quando isto acontece, pode-se dizer que o sistema está em equilíbrio e o valor das variáveis de estado que estão nesta condição se encontram em um “ponto de equilíbrio”. Isto ocorre porque os pontos de equilíbrio são obtidos a partir da equação $\dot{h} = f(h, v, \tilde{w})$, onde $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ e $f(h, v, \tilde{w})$ é a função que descreve a dinâmica do sistema em função dos estados h , das entradas v e dos distúrbios \tilde{w} . Considerando $\dot{h} = 0$, sendo que todo ponto de equilíbrio satisfaça a relação algébrica $f(h, v) = 0$ (TROFINO, 2015).

Para o caso da estufa agrícola, o ponto de equilíbrio pode ser obtido considerando as derivadas das Equações (1) e (2) iguais a zero, e considerando as Equações (3) e (5) com suas respectivas substituições, ou seja

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = 0 \quad , \quad \frac{dw_{in}(t)}{dt} = 0 \quad (7)$$

Usualmente, \bar{h}_1 e \bar{h}_2 são valores conhecidos. Na metodologia apresentada neste trabalho eles correspondem aos valores de temperatura e umidade internas próximos da condição nominal de operação da estufa. Assim, considerando também um conjunto de condições climáticas externas (temperatura, umidade e radiação solar), é possível descrever \bar{v} pelas relações representadas nas Equações (8) e (9).

$$\bar{v}_1 = \frac{-(UA[T_{in}-T_{out}]+\lambda \beta_t w_{in}-A_s S_i(1+\alpha))}{\rho V_R(\lambda[w_{in}-w_{out}]+C_p[T_{in}-T_{out}])} \quad (8)$$

$$\bar{v}_2 = \frac{[T_{in}-T_{out}](C_p(\lambda \beta_t w_{in}-\alpha A_s S_i)-\lambda UA[w_{in}-w_{out}])+\lambda A_s S_i[w_{in}-w_{out}]}{\lambda q_{fog}(\lambda[w_{in}-w_{out}]+C_p[T_{in}-T_{out}])} \quad (9)$$

Uma vez escolhido o ponto de equilíbrio do sistema, pode-se obter por linearização um modelo simplificado que descreve o comportamento do sistema nas proximidades desse ponto. Para que se possa linearizar o sistema em torno de um determinado ponto, é necessário que a função $f(h, v)$ seja continuamente diferenciável neste ponto. Geometricamente essa aproximação corresponde em aproximar uma curva pela reta tangente à ela no ponto em questão (TROFINO, 2015).

Para funções $f(h)$ vetoriais, a linearização é feita para todos os componentes $f_i(h)$. A linearização de uma função $f(h)$ no ponto $\bar{h} = [\bar{h}_1 \ \bar{h}_2 \ \dots \ \bar{h}_n]$ está representada na Equação (10), onde a notação $\frac{\partial f(\bar{h})}{\partial h_i}$ indica a derivada parcial de f em relação à h_i calculada no ponto \bar{h} . Este procedimento resulta em uma matriz de derivadas primeiras que recebe o nome de matriz Jacobiana, que está representada na Equação (11) (TROFINO, 2015).

$$f(h) \approx f(\bar{h}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\bar{h})}{\partial h_i} (h_i - \bar{h}_i) \quad (10)$$

$$J_{(f,h)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial h_1} & \frac{\partial f_1}{\partial h_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial h_1} & \frac{\partial f_n}{\partial h_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial h_n} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Dessa forma, a aproximação linear de $f(h)$ no ponto \bar{h} é dada por

$$f(h) \approx f(\bar{h}) + J_{(f,h)}(h - \bar{h}) \quad (12)$$

Com o auxílio da função *jacobian* do *software Matlab/Simulink*, pode-se encontrar as matrizes jacobianas que representam este modelo. Considerando o sistema linearizado da Equação (13), onde A é a matriz jacobiana de f em relação aos estados h , B é a matriz jacobiana de f em relação as variáveis de controle v e B_w a matriz jacobiana de f relacionada

aos distúrbios \tilde{w} . Desse modo, as matrizes jacobianas que representam este sistemas são representadas nas Equações (14), (15) e (16).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_w \tilde{v}(t) \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(-\frac{UA}{\rho C_p V} - \frac{V_R}{V} \right) & 0 \\ 0 & \left(-\frac{V_R}{V} - \frac{\beta_t}{\rho V} \right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{V_R}{V} [T_{in} - T_{out}] & -\frac{\lambda q_{fog}}{\rho C_p V} \\ -\frac{V_R}{V} [w_{in} - w_{out}] & \frac{q_{fog}}{\rho V} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho C_p V} & \left(\frac{UA}{\rho C_p V} + \frac{V_R}{V} \right) & 0 \\ \frac{\alpha}{\rho V \lambda} & 0 & \frac{V_R}{V} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Onde os estados, as variáveis de controle e os distúrbios são representados por,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{in} \\ w_{in} \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_R^* \\ q_{fog}^* \end{bmatrix} \quad \tilde{v} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_1 \\ \tilde{v}_2 \\ \tilde{v}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_i \\ T_{out} \\ w_{out} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Lembrando que o estado $x = h - \bar{h}$, a variável de controle $u = v - \bar{v}$ e os distúrbios $\tilde{v} = w - \bar{w}$ do sistema linearizado indicam a variação do estado, controle e dos distúrbios não lineares em relação ao ponto de equilíbrio.

3.3 Desenvolvimentos dos controladores

Embora o trabalho em ambiente fechado facilite a tarefa de controle ambiental, as estratégias de controle adequadas são fundamentais para manter as principais variáveis dentro dos requisitos do projeto. A utilização de sistemas micro controlados permitiram aos

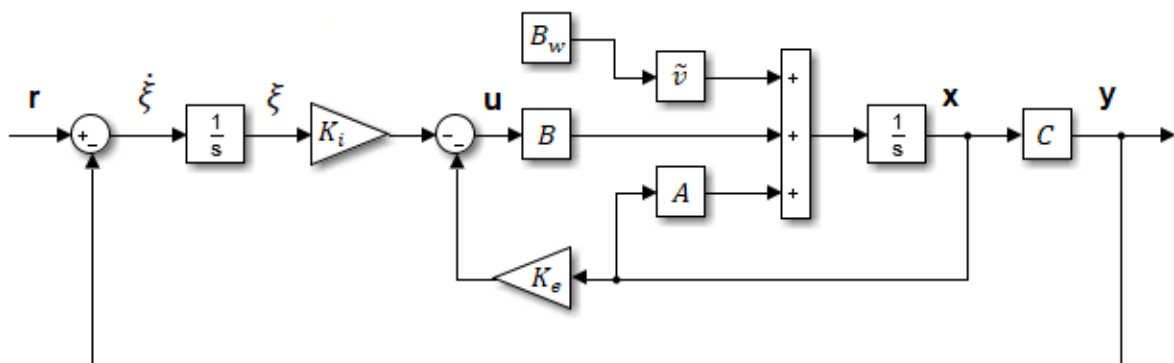
produtores controlarem de forma automática os principais parâmetros relacionados ao bom desenvolvimento da cultura cultivada. Sendo assim, duas técnicas de controle serão analisadas para o controle microclimático de uma estufa agrícola.

3.3.1 Realimentação de estados com alocação de polos

O projeto de controladores para sistemas dinâmicos visa estabilizar o sistema em malha fechada e, em geral, deve-se satisfazer as restrições adicionais como, por exemplo, resposta transitória, rejeição das perturbações e limitações dos sinais de controle. Quando os sinais de controle são construídos com informações das variáveis de estados, tem-se que o controle é dito por realimentação de estados (TROFINO, 2015).

Uma forma de garantir que o erro em regime permanente (diferença entre o valor instantâneo e o valor de referência) seja nulo para as referências do tipo degrau consiste na utilização de integradores no sistema. A Figura 9 representa este arranjo em linguagem de blocos, onde x é o estado do sistema (medido com ganho unitário), ξ o estado dos integradores (monitorados em tempo real), K_i e K_e são os ganhos que precisam ser determinados dos integradores e da realimentação de estados, respectivamente, de tal forma a encontrar erro nulo em regime permanente da referência r para a saída y . (TROFINO, 2015).

Figura 9 – Diagrama representativo utilizando rastreamento com integradores (Fonte: do Autor)



Este tipo de sistema, pode ser representado também pelas Equações (18), (19) e (20).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_w \tilde{v} \quad (18)$$

$$u(t) = -K_e x(t) - K_i \xi(t) \quad (19)$$

$$\dot{\xi}(t) = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t) \quad (20)$$

As equações de estado também podem ser representadas na forma compacta de matrizes, como segue nas Equações (21) e (22).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix}}_{\dot{x}_a} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_a} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix}}_{x_a} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_a} u + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}}_{E_a} r + B_w \tilde{v} \quad (21)$$

$$u = - \underbrace{\begin{bmatrix} K_e & K_i \end{bmatrix}}_{K_a} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix}}_{x_a} \quad (22)$$

Neste tipo de representação, o problema a ser resolvido consiste simplesmente em determinar a matriz K_a de tal forma que o sistema, representado na Equação (23), seja estável (TROFINO, 2015).

$$\dot{x}_a = (A_a - B_a K_a) x_a + E_a r + B_w \tilde{v} \quad (23)$$

Para o problema em questão, as matrizes A , B e B_w serão obtidas com base no modelo linearizado da estufa. Supõe-se que todos os estados estão sendo monitorados. Dessa forma, $y = x$ e $C = I_n$, onde I_n é a matriz identidade com dimensão n .

Com base no desenvolvimento visto até aqui, é possível redefinir o problema de projeto da seguinte maneira: considere o MIMO linear e afim, apresentado na Equação (23). Supondo a lei de controle definida na Equação (22), determinar a matriz de ganhos K_a de tal forma que o sistema em malha fechada satisfaça os seguintes requisitos: (i) o regime permanente seja atingido, isto é, o sistema seja estável; (ii) que a resposta transitória satisfaça certos critérios de desempenho (TROFINO, 2015).

O sistema da Equação (23) também pode ser representado por uma função de transferência. No caso em questão, o sistema é multivariável e a função de transferência é uma matriz que define a relação de cada entrada para cada saída do sistema (TROFINO, 2015).

Os polos de uma função de transferência são os valores da variável da transformada de Laplace, s , que fazem com que a função de transferência se torne infinita ou qualquer raiz do denominador da função de transferência que são comuns as raízes do numerador. Ou seja, as raízes do polinômio característico no denominador são os valores de s que tornam a função de transferência infinita (NISE, 2013).

A localização dos polos em malha fechada define a estabilidade e está diretamente ligada ao regime transitório do sistema. Assim, a escolha adequada dos polos determinará o bom funcionamento do sistema tanto em regime transitório como em permanente. Entretanto, o regime transitório também depende dos zeros do sistema, sendo que este processo é puramente iterativo até que os requisitos sejam atendidos nas simulações. (TROFINO, 2015).

É possível relacionar os polos da função de transferência com os autovalores da matriz de dinâmica do sistema (neste caso A_a). Assim, o objetivo principal é encontrar a matriz de ganhos K_a de tal forma que os autovalores de $(A_a - B_a K_a)$ sejam $\{\lambda_1, \dots, \lambda_{2n}\}$. Para isso, deve-se ter:

$$(A_a - B_a K_a)r_v = \lambda_i r_v \quad (24)$$

Sendo λ_i autovalores e r_v seus respectivos autovetores. Assim, reescrevendo as condições acima, tem-se:

$$(A_a - \lambda_i I)r_v - B_a K_a r_v = M_i g_i = 0 \quad (25)$$

$$M_i = [(A_a - \lambda_i I) \quad - B_a] \quad (26)$$

$$g_i = \begin{bmatrix} r_v \\ K_a r_v \end{bmatrix} \quad (27)$$

A matriz de ganhos K_a pode ser determinada com o auxílio da função *place* do *software Matlab/Simulink*. Esta função posiciona os polos desejados em malha fechada, de tal forma que os autovalores $(A_a - B_a K_a)$ sejam relacionados com essas posições. Uma primeira aproximação para o posicionamento dos polos, consiste em calcular os autovalores da matriz

A_a utilizando a função *eig*, que estão diretamente relacionados com os estados. Lembrando que ao utilizar o rastreamento com integradores, representados na Figura 9, o sistema será aumentado, sendo que 2 polos serão relacionados aos estados e 2 polos aos integradores.

3.3.2 Regulador Linear Quadrático (LQR)

O regulador linear quadrático (LQR, do inglês *Linear Quadratic Regulator*), baseia-se na minimização de um critério quadrático associado à energia das variáveis de estado e dos sinais de controle a serem projetados.

Inicialmente, considere o sistema de controle apresentado na Equação (23). Pode-se verificar que quanto maior for a energia do estado $\int_{t=0}^{\infty} x_a(t)'x_a(t) dt$, mais oscilatório e/ou lento é o sistema. Por outro lado, quanto maior for a energia do controle $\int_{t=0}^{\infty} u(t)'u(t) dt$, maior será o esforço dos atuadores no sentido de que o vetor de controle possui maiores amplitudes e/ou os atuadores são excitados em regime transitório durante um período maior. Para maiores detalhes sobre essa análise recomenda-se a leitura das referências Trofino (2015) e Johnson e Grimble (1987).

Idealmente, deve-se ter uma pequena energia associada ao estado e ao controle, mas isso não é possível pois o sistema se torna muito rápido devido a um esforço maior dos controladores. A premissa de projeto do controlador LQR é estabelecer um equilíbrio entre as energias de estado e controle, a fim de que a função custo, apresentada na Equação (28), seja minimizada, onde Q, R, N são matrizes de ponderação que definem o sinal $z(t)$, definido pelos requisitos do projeto para representar o equilíbrio desejado. Tipicamente Q, R são definidas como matrizes diagonais e N uma matriz nula. Neste caso $x(t)'Qx(t) = \sum_{i=1}^n q_i x_i(t)^2$ e $u(t)'Ru(t) = \sum_{i=1}^{n_u} r_i u_i(t)^2$ onde q_i, r_i são os elementos positivos das diagonais das matrizes Q, R (TROFINO, 2015).

$$J = \min_{u(t)} \int_0^{\infty} z(t)'z(t) dt \quad (28)$$

$$z(t)'z(t)dt = \begin{bmatrix} x_a(t) \\ u(t) \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} Q & N \\ N' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Como o sinal de controle deve minimizar a função custo, representada pela Equação (28), os elementos da matriz Q devem ser escolhidos de maneira que q_i seja maior que q_j , quando a minimização da energia associada a variável x_i for prioritária em relação à minimização da energia de x_j . Os elementos da matriz R , r_i e r_j , da ponderação do sinal de controle são escolhidos de forma análoga (TROFINO, 2015).

Considerando que o sistema apresentado na Equação (23), seja estável e o critério quadrático apresentado na Equação (29), com $Q > 0$, $R > 0$ e $N = 0$. A lei de controle que estabiliza o sistema e minimiza o critério em (28) encontra-se definida em (22), onde $K_a = R^{-1}B_a'P$, sendo P a única solução positiva definida pela Equação (30), também conhecida por equação de *Riccati* (TROFINO, 2015).

$$A'P + PA - PBR^{-1}B'P + Q = 0 \quad (30)$$

O processo de escolha dos valores das matrizes Q e R pode ser realizado de várias maneiras. Alguns métodos são apresentados em Johnson e Grimble (1987). Neste trabalho, a escolha da matriz Q será realizada utilizando os valores máximos dos estados da estufa (x) e dos integradores (ξ), vista na Equação (31). Pelo fato de o sistema de nebulização requerer água para o funcionamento, um recurso natural que deve ser empregado de forma racional, os valores da diagonal da matriz R serão escolhidos de forma que o critério da Equação (28) minimize o seu uso. Logo, a energia associada a este valor deverá ser menor que a energia associada à ventilação. Sendo assim, para os valores da matriz R , apresentados na Equação (32), o critério de ponderação será estabelecido como $r_2 > r_1$.

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{(x_1^{max})^2} & & & \\ & \frac{1}{(x_2^{max})^2} & & \\ & & \frac{1}{(\xi_1^{max})^2} & \\ & & & \frac{1}{(\xi_2^{max})^2} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações e análise de desempenho dos controladores abordados no presente trabalho.

4.1 Análise do modelo matemático

O modelo matemático apresentado na seção anterior foi submetido a diferentes testes, antes da implementação dos controladores. Para isso, foram feitas algumas simulações, utilizando o *software Matlab/Simulink*, com determinados parâmetros fixos, havendo mudanças apenas nas condições climáticas externas, para se ter uma melhor compreensão da dinâmica natural do sistema apresentado. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros com valores fixos nas simulações.

Parâmetros	Unidades	Valores
ρ	kg/m^3	1,2
C_p	$J/kg K$	1.006
V	m^3	$0,65 V_{geo}$
λ	J/g	2.257
UA	W/K	25.000
α	-	0,129524267
β_t	$kg/s m^2$	0,015

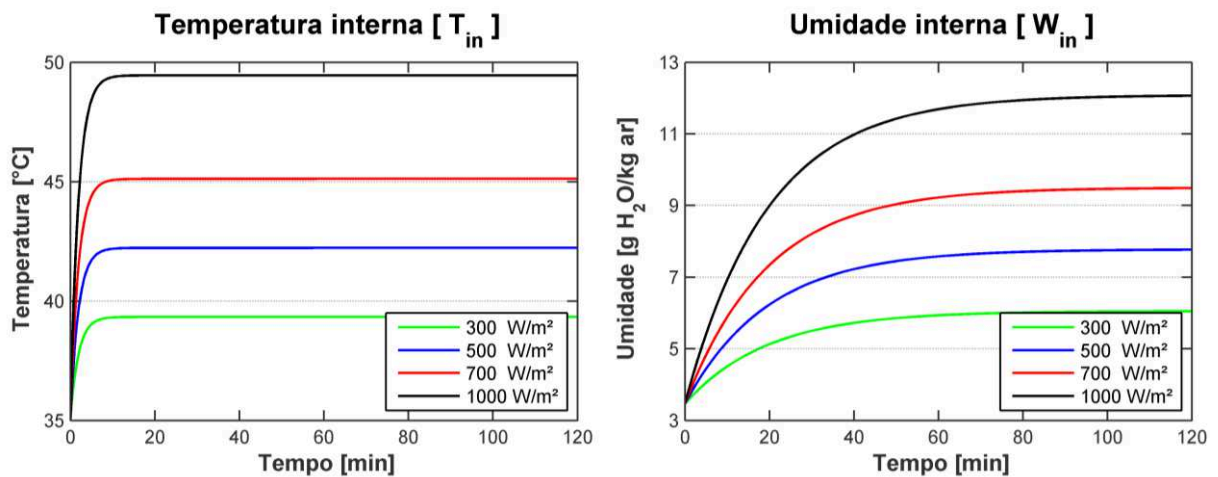
Fonte: Adaptado de ZENG et al. (2012)

A vazão volumétrica máxima fornecida pelo sistema de ventilação é de $22,2 \frac{m^3}{s}$. A vazão mássica máxima disponibilizada pelo sistema de nebulização (*fog system*) é de $1.125,5 \frac{g H_2O}{s}$. A estrutura da estufa possui uma área superficial de $1.000 m^2$, com um volume geométrico de $3.996 m^3$, possuindo uma tela de sombreamento que reduz a transmissão da radiação solar em 60% (ZENG et al., 2012). Somente para este teste, os valores dos atuadores foram fixados para perceber apenas o comportamento do sistema térmico. A ventilação foi fixada em 10%

da sua capacidade máxima, e o valor do sistema de nebulização foi fixado em zero, assim não possuindo interferência no sistema.

Primeiramente, foi analisado o efeito da radiação solar sobre o sistema, variando-a entre 300 e 1.000 W/m^2 . Para este teste, as condições iniciais e as condições climáticas externas foram fixadas em $T_{out} = 35\text{ }^\circ\text{C}$ e $W_{out} = 3,47\text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 10\%$), sendo a temperatura e umidade externa, respectivamente. Estes resultados são apresentados na Figura 10.

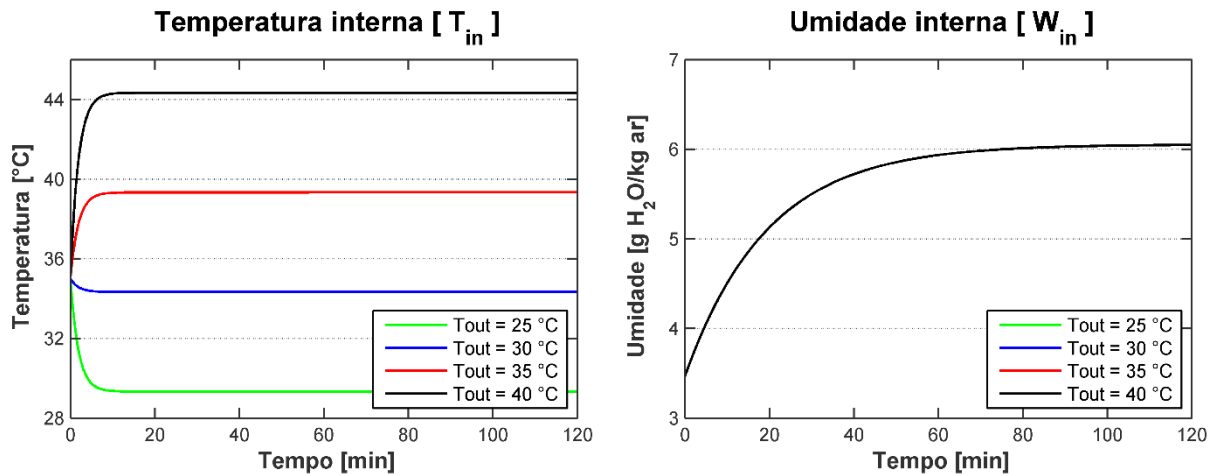
Figura 10 – Variáveis internas quando submetidas as mudanças na radiação solar (Fonte: do Autor).



Pode-se perceber claramente a influência direta da radiação solar em relação a temperatura e umidade interna. Em um dia de verão com céu limpo, por exemplo, e uma radiação solar próxima aos 1000 W/m^2 , com apenas a ventilação em um valor mínimo, a temperatura interna pode chegar próxima aos 50 $^\circ\text{C}$. Esta variação da radiação solar, pelo fato de influenciar no aumento da taxa de evapotranspiração das plantas, acaba colaborando também para a elevação dos níveis da umidade absoluta interna.

Na sequência, foi realizado um teste em que a temperatura externa (T_{out}), foi variada de 25 a 40 $^\circ\text{C}$ em intervalos de 5 $^\circ\text{C}$. O fluxo de calor incidente devido à radiação solar foi mantido em 300 W/m^2 , e a umidade absoluta externa em 3,47 $g\text{ H}_2\text{O/kg ar}$ (o que equivale a $\phi = 10\%$ para uma temperatura de 35 $^\circ\text{C}$). Os resultados são apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Variáveis internas quando submetidas as mudanças na temperatura externa (Fonte: do Autor).



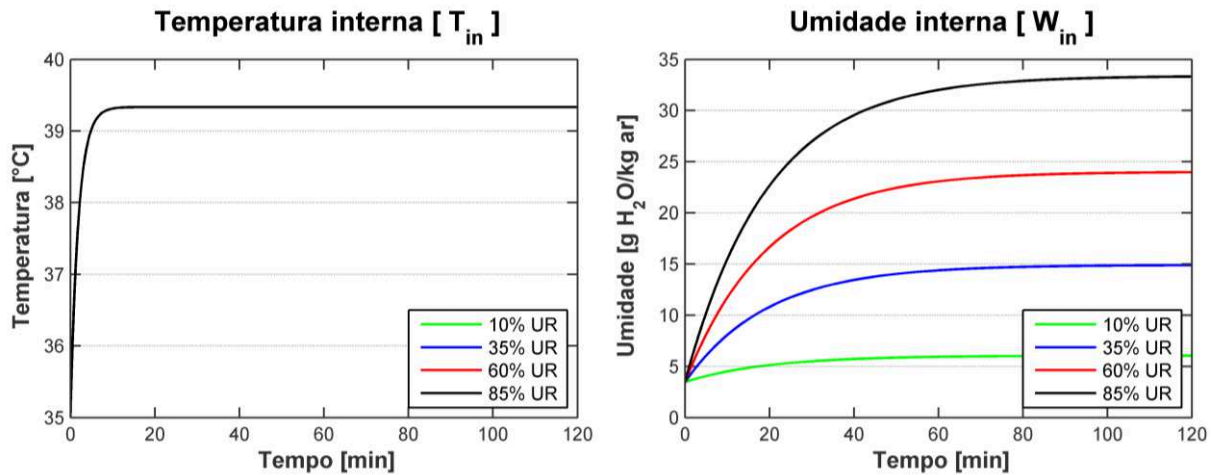
A temperatura externa influencia diretamente a temperatura do ambiente interno, pois modifica os termos de fluxo advectivo de energia e de troca de calor por convecção, como observado na Equação (1). Por outro lado, os resultados da umidade interna aparecem sobrepostos, demonstrando que a umidade absoluta no interior da estufa não depende da temperatura externa, como sugerido pelo balanço de massa de vapor d'água, representado pela Equação (2). A umidade relativa interna é afetada pela temperatura externa, pois a pressão de saturação da água varia com a temperatura interna. Para o caso em que $T_{out} = 40\text{ °C}$, $T_{in} \cong 44\text{ °C}$ e $\phi \cong 10\%$. Já quando $T_{out} = 25\text{ °C}$, $T_{in} \cong 29\text{ °C}$ e $\phi \cong 24\%$.

Finalmente, no último teste realizado, foi proposta uma variação da umidade relativa externa entre $3,47\text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 10\%$) e $30,82\text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 85\%$). O fluxo de calor incidente devido à radiação solar e a temperatura externa foram mantidos em 300 W/m^2 e 35 °C , respectivamente. Os resultados apresentados na Figura 12, mostram que a temperatura interna não é influenciada por mudanças na umidade externa. Apenas a Equação da conservação de massa, dependente da umidade externa, possui mudanças relacionadas a esta variação.

Apesar de o modelo matemático não ter sido validado com dados experimentais, esta análise preliminar mostrou que os resultados obtidos apresentam tendências fisicamente consistentes, o que é um indicativo de sua correta implementação. Com isto, pode-se perceber claramente que as condições climáticas externas possuem uma importante participação nas mudanças que ocorrem no ambiente interno. Deste modo há uma necessidade de um sistema de controle que possa estabelecer condições ambientais

adequadas para as plantas, não permitindo que se chegue a valores extremos de temperatura e umidade.

Figura 12 – Variáveis internas quando submetidas as mudanças na umidade externa (Fonte: do Autor).



4.2 Ponto de equilíbrio do modelo não linear

Como visto na seção anterior, há uma necessidade de estabelecer um ponto de equilíbrio para que o modelo seja linearizado em torno de uma condição de operação. Baseado em Albright (2001), as condições de operação para o ponto de equilíbrio, com relação as variáveis externas são: $T_{out} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $W_{out} = 3,47 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ (equivalente a $\phi = 10\%$ para uma temperatura de $35 \text{ }^\circ\text{C}$) e $S_i = 300 \text{ W/m}^2$, sendo temperatura externa, umidade absoluta externa e radiação solar incidente, respectivamente. As condições de temperatura e umidade internas são, $T_{in} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ e $W_{in} = 16,045 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ (equivalente a $\phi = 60\%$ para uma temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$), respectivamente.

Com isso, para estas condições de operação, os valores das variáveis de controle (u), de acordo com as relações das Equações (8), (9) e (17), são definidos como:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4190 \\ 0,1185 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Deste modo, as análises subsequentes serão feitas com base nestas condições e para este ponto de equilíbrio calculado.

4.3 Análise do controlador por realimentação de estados com alocação de polos

A implementação utilizando alocação de polos foi realizada, considerando o sistema aumentado, utilizando a técnica de rastreamento por integradores, representado na Figura 9. Primeiramente, os polos foram alocados nas seguintes posições do eixo real: -0,0116 -0,0036 -0,002 -0,002, onde a 1° e 2° posições representam os polos relacionados a temperatura e umidade, respectivamente, e a 3° e 4° posições relativas aos integradores dos respectivos estados.

Existem algumas formas de escolher a posição dos polos, no presente trabalho as posições relacionadas a temperatura e umidade, foram escolhidas de acordo com os autovalores da matriz A . Já as posições relacionadas com os integradores, foram escolhidas de forma arbitrária levando em consideração os limites dos estados e dos atuadores.

De acordo com a Equação (23), a matriz de ganhos (K_a) é composta por K_e e K_i , relacionados aos estados e aos integradores respectivamente. Para as posições dos polos apresentadas, os valores calculados para a matriz (K_a) é:

$$K_a = \left[\underbrace{\begin{bmatrix} -0,0103 & -0,0228 \\ -0,0031 & -0,0012 \end{bmatrix}}_{K_e} \quad \underbrace{\begin{pmatrix} 0,1170 & 0,0815 \\ 0,0348 & 0,0043 \end{pmatrix}}_{K_i} * 10^{-3} \right] \quad (34)$$

Após a implementação do controlador, foram realizados alguns testes para avaliar a atuação dos controladores, frente a mudanças nas referências e variáveis externas. Primeiramente, a mudança dos valores das referências, de acordo com as seguintes condições:

- Referência da Umidade: variação de 16,045 $g H_2O/kg ar$ ($\phi = 60\%$) para 21,58 $g H_2O/kg ar$ ($\phi = 80\%$), em $t = 100$ min;
- Referência da Temperatura: variação de 30 °C para 28 °C, em $t = 200$ min;

A radiação solar permaneceu fixa em 300 W/m^2 , a temperatura externa em 35 °C e a umidade relativa em 10% (3,47 $g H_2O/kg ar$). Os resultados são apresentados nas Figuras 13 e 14, com a resposta das variáveis internas e dos atuadores, respectivamente.

Figura 13 – Respostas ao degrau das variáveis internas (Fonte: do Autor).

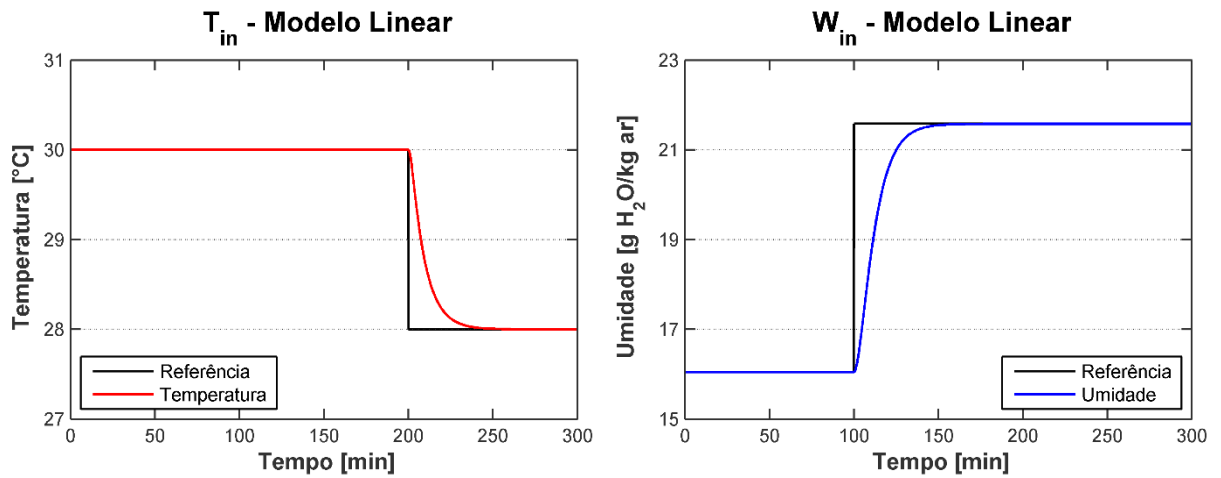
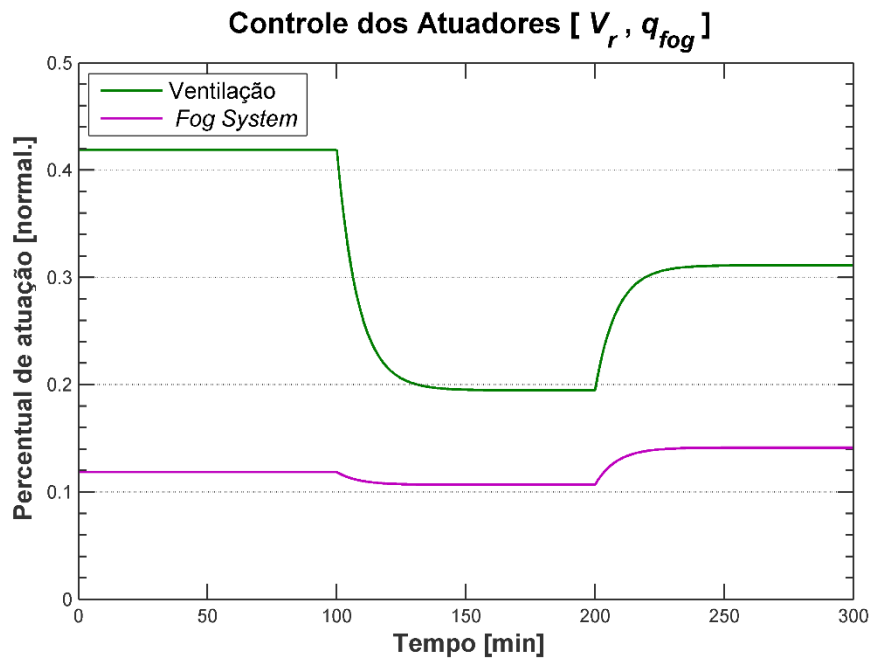


Figura 14 – Respostas dos atuadores quando submetidos ao degrau (Fonte: do Autor).

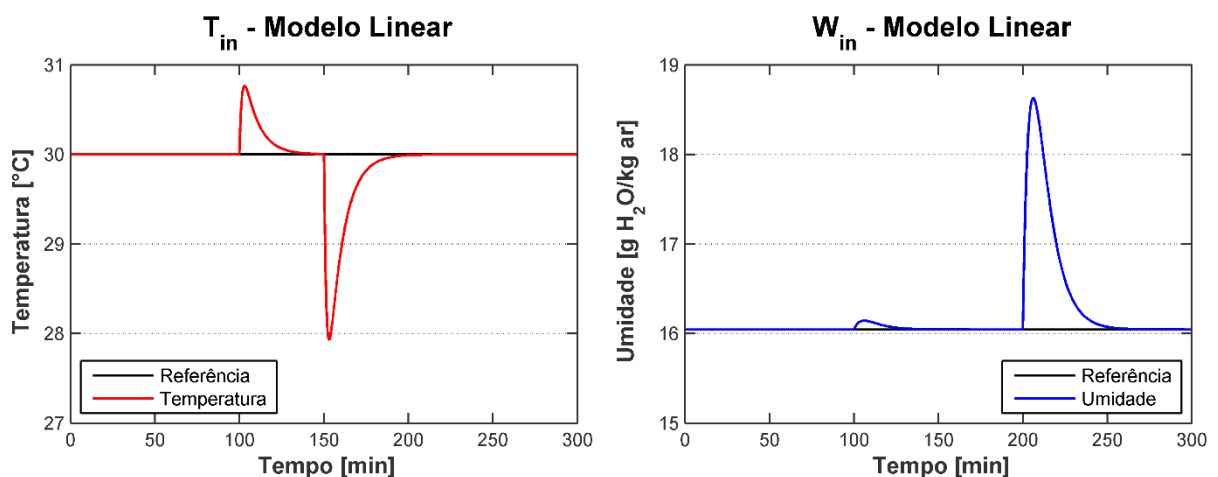


Na Figura 13, é possível verificar o seguimento adequado quando ocorre a mudança na referência. As variáveis climáticas influenciam diretamente nas mudanças das condições internas. Já na Figura 14, é possível perceber a transição gradual dos atuadores perante às mudanças nos valores de referências. Dessa forma, a seguinte análise foi realizada, alterando as variáveis externas, consideradas no presente trabalho como distúrbios do sistema. O teste foi realizado nas seguintes condições:

- Radiação global (S_i): variação de 300 para 500 W/m^2 , em $t = 100 \text{ min}$;
- Temperatura externa (T_{out}): variação de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ para $32 \text{ }^\circ\text{C}$, em $t = 150 \text{ min}$;
- Umidade externa (W_{out}): variação de $3,47 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 10\%$) para $8,89 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 30\%$), em $t = 200 \text{ min}$.

O valor de referência da temperatura interna permaneceu em $30 \text{ }^\circ\text{C}$, e a umidade interna permaneceu em $\phi = 60\%$, equivalente a $16,045 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$. As Figuras 15 e 16 apresentam os resultados.

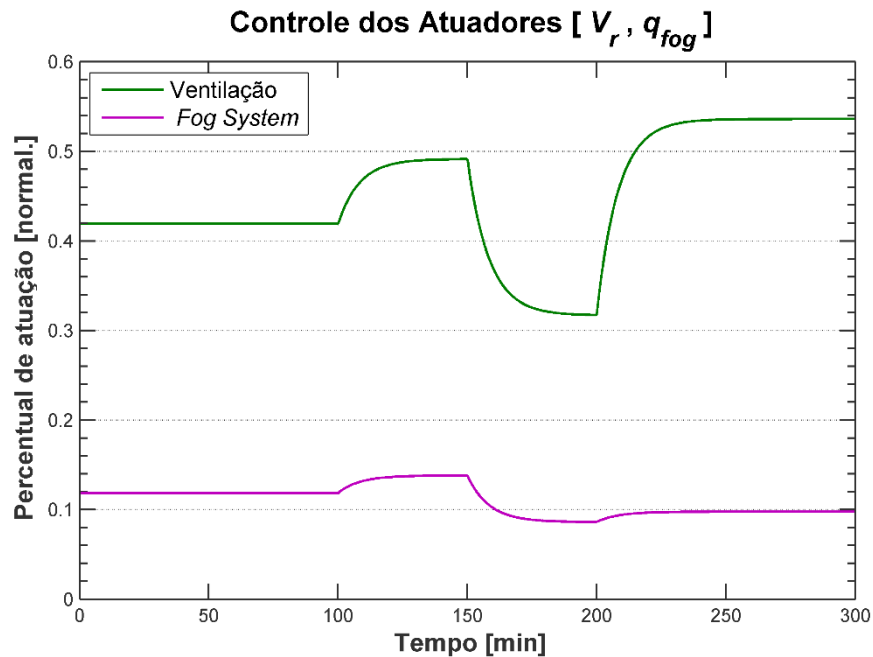
Figura 15 – Respostas do sistema quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).



Pode-se perceber uma clara sensibilidade no ambiente interno, devido às mudanças nas condições climáticas externas, como citado anteriormente. A radiação solar, tendo uma influência maior na temperatura interna em $t = 100 \text{ min}$ e com pouca influência na umidade interna. Isto demonstra a ação dos atuadores para compensar estes distúrbios e reestabelecer as condições de equilíbrio ao sistema. Mesmo o ambiente possuindo uma sensibilidade considerável, os controladores possuem uma resposta rápida, atuando de forma direta na temperatura e umidade internas.

É importante salientar que a atenuação dos distúrbios é realizada sem a necessidade de leitura dos valores através de sensores. Isso representa uma vantagem dessa técnica em comparação com outros resultados já apresentados na literatura, como por exemplo em Albright et al., (2001).

Figura 16 – Respostas dos atuadores quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).



Verificou-se também o comportamento do controle por alocação de polos com o sistema que representa a dinâmica original do sistema, ou seja, não linear. Assim, é possível analisar a robustez do sistema, tendo em vista que o modelo não linearizado está sujeito a complexidades intrínsecas às equações que descrevem o balanço de energia e de massa.

Utilizando as mesmas condições do segundo teste (Figuras 15 e 16), as Figuras 17 e 18 apresentam a resposta das variáveis internas para esta variação das condições climáticas, e a resposta dos atuadores, respectivamente.

Figura 17 – Respostas do sistema não-linear quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).

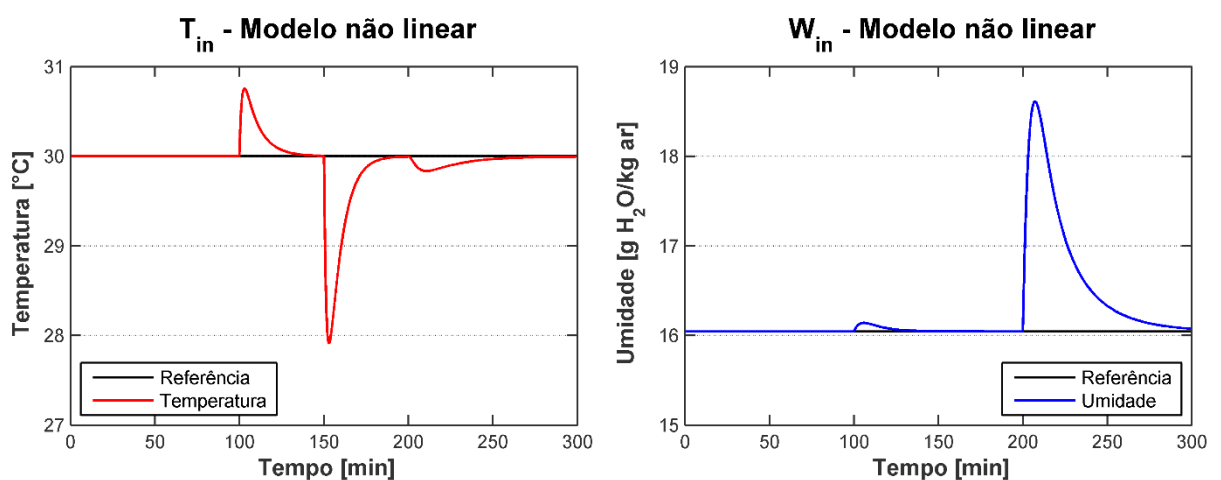
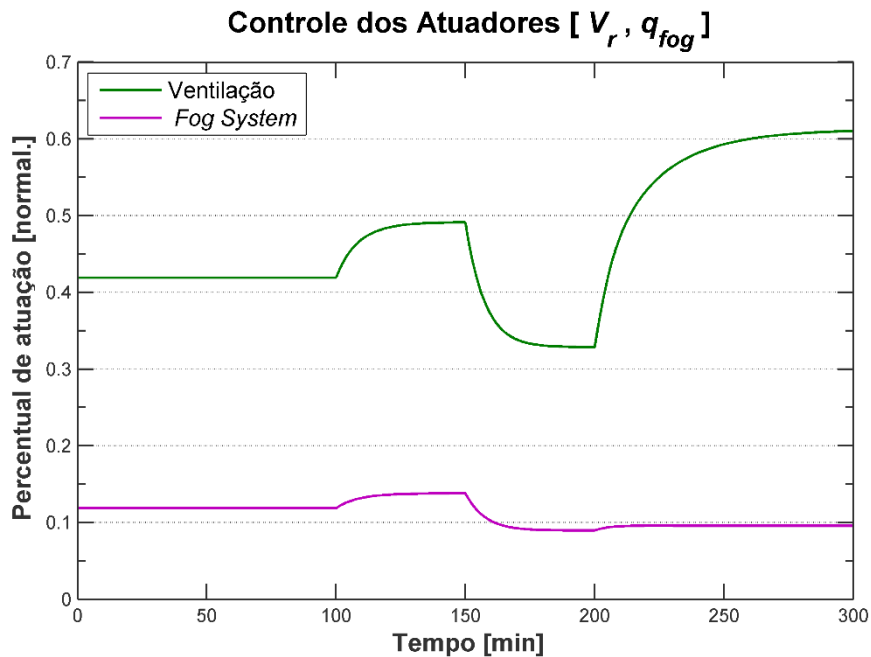


Figura 18 – Respostas dos atuadores quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).



O resultado mostra um comportamento muito próximo ao modelo linearizado, isto pode indicar que o controlador proposto não é sensível às não linearidades do sistema. Esta robustez demonstra a possibilidade de desenvolver leis de controle para a estufa agrícola com base no modelo linearizado e utilizando métodos originalmente elaborados para sistemas lineares.

No gráfico da Figura 17, pode ser visto uma pequena variação na temperatura interna em $t = 200$ min, devido a uma mudança na umidade externa. Mesmo a umidade externa não estando relacionada com a equação diferencial que descreve a variação da temperatura, é possível notar uma atuação maior da ventilação, de acordo com a Figura 18, o que leva a uma pequena redução na temperatura interna.

4.4 Análise do Regulador Linear Quadrático

A estratégia LQR utilizou a mesma estrutura com integradores empregada no método por alocação de polos e representada na Figura 9. A matriz Q , foi definida de acordo com os valores máximos dos estados, temperatura e umidade absoluta, e dos integradores, sendo $x_1 = \xi_1 = 40$ e $x_2 = \xi_2 = 50$. A matriz R é uma matriz associada aos sinais de controle dos atuadores, sendo que é necessário estabelecer um peso para seus elementos. Como o *fog*

system possui uma interferência muito maior na redução da temperatura, e com o objetivo de reduzir o consumo de água deste atuador, o seu valor será maior que o elemento associado à ventilação. Os valores definidos das matrizes Q , R e K_a , são apresentados nas Equações (35), (36) e (37).

$$Q = \begin{bmatrix} 6,25 * 10^{-4} & & & \\ & 4,00 * 10^{-4} & & \\ & & 6,25 * 10^{-4} & \\ & & & 4,00 * 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$R = \begin{bmatrix} 3500 & \\ & 12000 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$K_a = \begin{bmatrix} -0,0165 & -0,0490 & (0,1953 & 0,2998) \\ -0,0117 & 0,0071 & (0,2024 & -0,0844) \end{bmatrix} * 10^{-3} \quad (37)$$

De forma análoga, o primeiro teste foi realizado sob a mudança dos valores de referência da temperatura e umidade, nas seguintes condições:

- Referência da Umidade: variação de $16,04 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 60\%$) para $21,58 \text{ g H}_2\text{O/kg ar}$ ($\phi = 80\%$), em $t = 100 \text{ min}$;
- Referência da Temperatura: variação de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ para $28 \text{ }^\circ\text{C}$, em $t = 200 \text{ min}$;

A radiação solar permaneceu fixa em 300 W/m^2 , a temperatura externa em $35 \text{ }^\circ\text{C}$ e a umidade relativa em 10% . Os resultados são apresentados nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Respostas comparativas devido as mudanças nas referências (Fonte: do Autor).

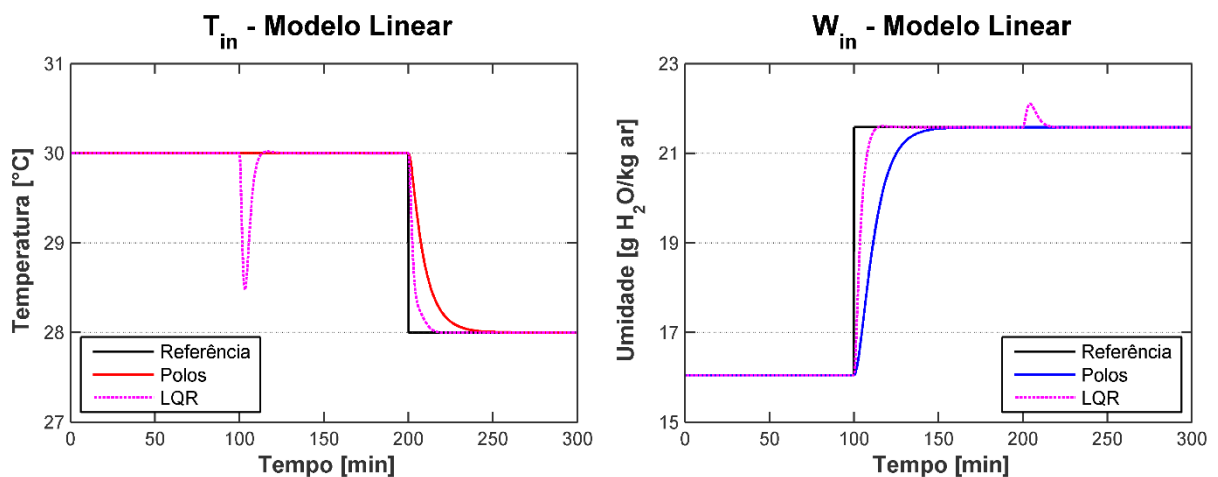
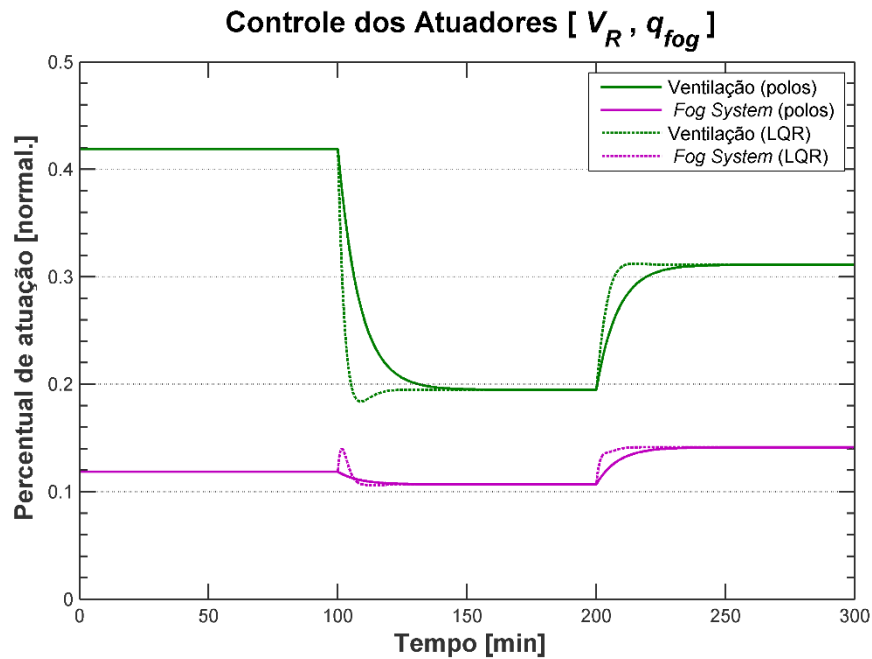


Figura 20 – Respostas dos atuadores devido às mudanças nas referências (Fonte: do Autor).

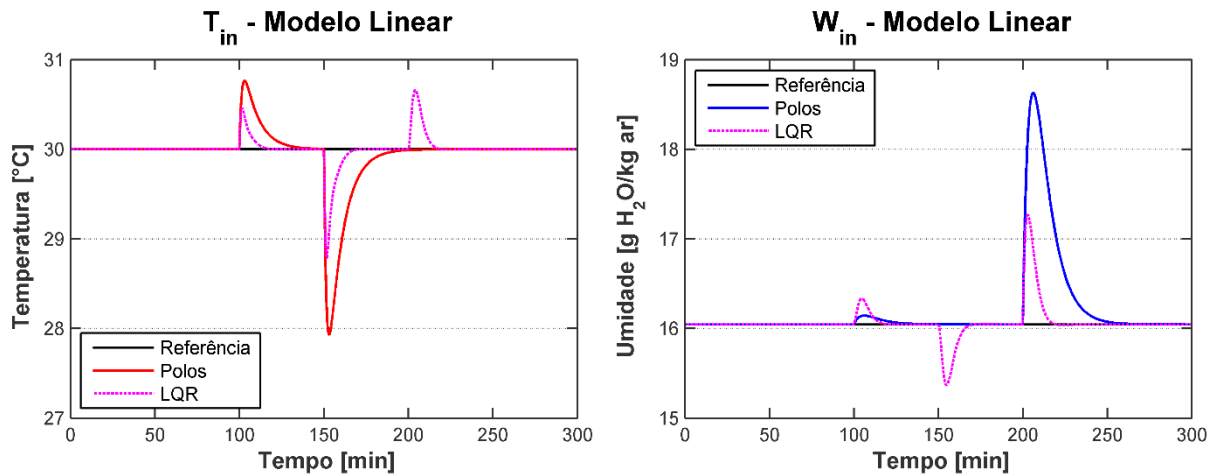


Os resultados da Figura 19, diferem dos apresentados na Figura 13, pois o controlador LQR se apresenta mais rápido, e com pequenas variações quando ocorrem as mudanças nos valores de referência. Isso pode ser confirmado também, pela Figura 20, apresentando diferenças no período transitório, mostrando que há uma interferência mais intensa do controlador LQR, do que a alocação de polos que apresenta uma mudança gradual até o regime permanente. O seguinte teste foi realizado, quando houve as mudanças nos distúrbios do sistema, nas seguintes condições:

- Radiação global (S_i): variação de 300 para 400 W/m^2 , em $t = 100$ min;
- Temperatura externa (T_{out}): variação de 35 °C para 32 °C, em $t = 150$ min;
- Umidade externa (W_{out}): variação de 3,47 $g H_2O/kg ar$ ($\phi = 10\%$) para 8,89 $g H_2O/kg ar$ ($\phi = 30\%$), em $t = 200$ min.

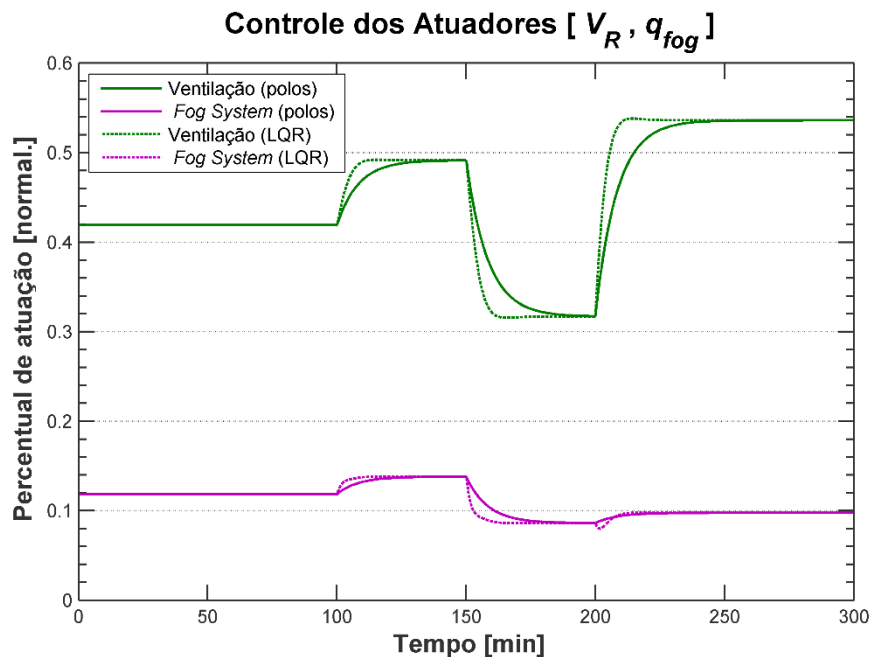
A referência da temperatura interna permaneceu em 30 °C, e a umidade interna permaneceu em 60%, equivalente a 16.045 $g H_2O/kg ar$. As Figuras 21 e 22 apresentam os resultados.

Figura 21 – Respostas do sistema linear quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).



De acordo com a Figura 21, houve uma resposta mais rápida por parte da temperatura e umidade internas, utilizando o controlador LQR, de acordo com as mudanças nos distúrbios do sistema, em diferentes períodos da simulação. Estas pequenas mudanças foram devido ao fato de o controlador atuar de forma mais rápida no sistema. Isso pode ser verificado na Figura 22, onde os controladores LQR são comparados com a alocação de polos.

Figura 22 – Respostas dos atuadores quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).



De forma análoga, o controlador LQR também foi implementado no modelo original, não linear, para verificar sua robustez perante as particularidades e complexidades das

equações diferenciais que descrevem o comportamento do sistema térmico. Utilizando as mesmas condições do segundo teste (Figuras 21 e 22), as Figuras 23 e 24 apresentam o comparativo entre as duas técnicas de controle utilizadas atuando no modelo não linear.

Figura 23 – Respostas do sistema não linear quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).

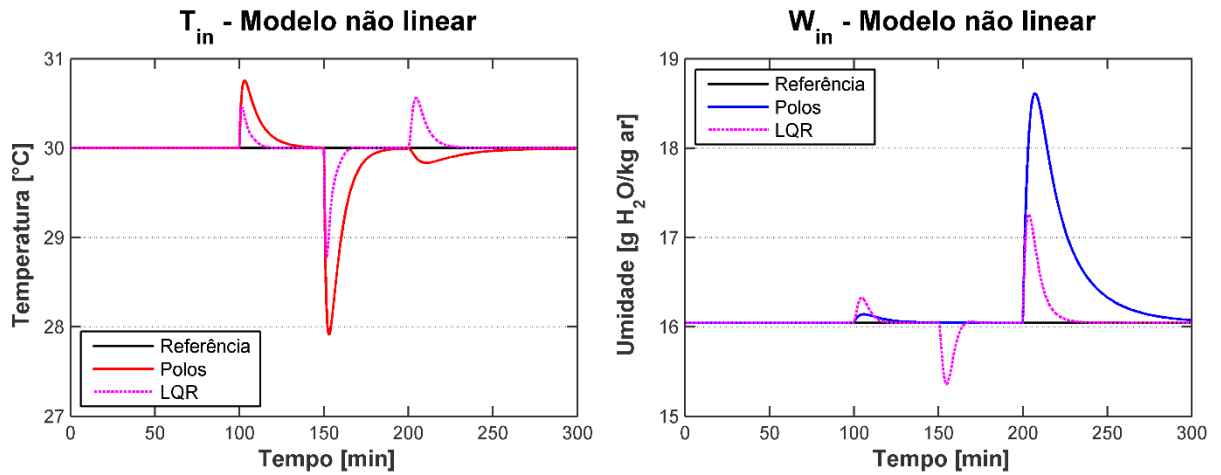
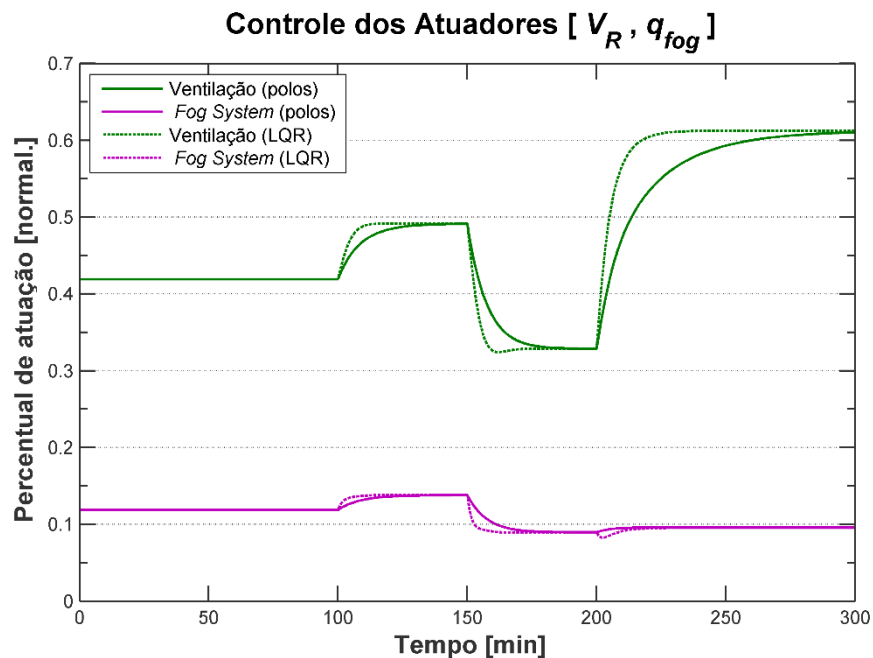


Figura 24 – Respostas dos atuadores quando submetidos aos distúrbios (Fonte: do Autor).



Verifica-se também um comportamento adequado do controle quando o modelo mais realístico da estufa (não linear) é considerado em simulação. De forma semelhante à técnica anterior, esse caso também demonstra a possibilidade de se utilizar técnicas de controle lineares para essa aplicação, tendo como base o modelo linearizado.

5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O presente trabalho analisou o modelo matemático que descreve o comportamento de uma estufa agrícola. Tal modelo apresentou um resultado satisfatório, podendo sofrer alterações significativas quando submetido às mudanças nas variáveis climáticas externas, o que indica uma forte influência destes distúrbios nas condições ambientais internas. Mesmo não sendo possível sua verificação com dados experimentais, o modelo apresentou uma tendência consistente de acordo com o comportamento de um sistema térmico real.

Os resultados do modelo não linear apresentaram um comportamento aproximado do modelo linearizado. Isto demonstra uma certa robustez dos controladores em atenuar as complexidades intrínsecas das equações diferenciais que relacionam o balanço de energia e massa.

Os controladores apresentaram bons resultados perante às mudanças nas referências e nas variações das condições externas. Ambos controladores apresentaram respostas muito próximas, com diferenças apenas no regime transitório. Esta similaridade em regime permanente decorre de que o modelo matemático é estritamente acoplado, sendo que em situação de equilíbrio, possui apenas uma única combinação entre os atuadores para determinados valores de temperatura, umidade e radiação solar.

Uma das vantagens da utilização dos controladores apresentados no trabalho, é de que não há necessidade de um sensoriamento das variáveis climáticas externas. Desse modo, o modelo matemático e as técnicas de controle se mostram confiáveis para quaisquer distúrbios externos, mesmo não efetuando o monitoramento das mesmas. Uma possibilidade de melhora no desempenho e na dinâmica do sistema, seria utilizar técnicas de inteligência artificial, como redes neurais e lógica *Fuzzy*, fazendo com que o sistema seja monitorado em tempo real ao invés de utilizar valores de ganhos estáticos.

Portanto, a utilização de sistemas de controle em cultivo protegido é fundamental e inevitável para auxiliar na competitividade do setor agrícola, principalmente na produção de hortaliças, e que possa ser validado buscando um menor consumo de energia e uso dos recursos naturais que são associados a produção de alimentos. Desta forma, poderá se pensar em reduzir o impacto ambiental desta atividade primária e caminhar em direção a um novo patamar da agricultura moderna.

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais, Rui Jorge Vaz dos Santos (*in memoriam*) e Rita de Cassie Cavalcante dos Santos e meus irmãos, Patric Cavalcante Pedroso (*in memoriam*) e Rafael Cavalcante dos Santos, pela dedicação, amor incondicional e proteção nos momentos mais difíceis, também aos meus familiares que sempre me apoiaram nesta longa caminhada.

Aos amigos que sempre estiveram dispostos a escutar meus devaneios, em especial aos amigos Douglas, Rafael, Rodrigo e Thiago.

Aos colegas e professores que pude conhecer durante esta jornada na UFSC e que também fazem parte desta conquista.

Aos meus orientadores César Cataldo Scharlau e Thiago Dutra por aceitarem o desafio, pela sabedoria e dedicação como conduziram o desenvolvimento do trabalho.

À Embrapa Hortaliças pela oportunidade e aos pesquisadores Ítalo Moraes Rocha Guedes, Juscimar da Silva e Marcos Brandão Braga, com quem tive a honra de trabalhar e de ampliar meus conhecimentos nas mais diversas áreas relacionadas à produção em cultivo protegido.

À minha namorada Janyara pela paciência, carinho e o amor na sua forma mais complexa, e por me fazer compreender que a felicidade só é real quando compartilhada.

Agradeço a Deus por chegar até aqui de cabeça erguida e por me fortalecer em alguns momentos onde a fraqueza parecia ser maior que a vontade de vencer.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte desta jornada e contribuíram para este momento especial.

REFERÊNCIAS

- A. BELHANI, N.K. M'SIRDI. Backstepping-based multi-criteria decision analysis for greenhouse control with real weather data. **International Review of Automatic Control**. 2(5), 592–599, 2009.
- ALBRIGHT, L. D.; GATES, R. S.; ARVANITIS, K. G.; DRYSDALE, A. E. Environmental control for plants on Earth and in space. **IEEE Control Systems Magazine**. v. 21, n. 5, p.28-47, Out. 2001. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/37.954518>.
- ANDRIOLO, Jerônimo Luiz. **Fisiologia das Culturas Protegidas**. Santa Maria: Editora UFSM, 2011. 142 p.
- BAKKER, J. C. et al. **Greenhouse Climate Control**. 1. ed. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 1995. 293 p.
- BENNIS, N. et al. Greenhouse climate modelling and robust control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 2, p. 96–107, 2008.
- BOULARD, T.; BAILLE, A. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 65, n. 3–4, p. 145–157, 1993.
- CASTILLA N. **Greenhouse Technology and Management**. 2. ed. Granada: CABI, 2013. 374 p.
- CHEN, J. et al. Energy demand forecasting of the greenhouses using nonlinear models based on model optimized prediction method. **Neurocomputing**, v. 174, p. 1–14, 2015.
- DUARTE-GALVAN, C. et al. Review. Advantages and disadvantages of control theories applied in greenhouse climate control systems. **Spanish Journal Of Agricultural Research**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.926-938, 28 nov. 2012. Instituto Nacional de Investigacion y Tecnologia Agraria y Alimentaria (INIA). <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2012104-487-11>.
- E. H. GURBAN, G. D. ANDREESCU. Employing 2DoF PID controllers to improve greenhouse climate system robustness. **In IEEE International Conference on System Science and Engineering-ICSSE 2013**. pp. 93–98. Budapest, Hungary, 2013.
- F. LAFONT, N. PESSEL, J.F. BALMAT, M. FLIESS. On the model-free control of an experimental greenhouse. **In Proceedings of World Congress on Engineering and Computer Science 2013-WCECS 2013**, vol. 2. San Francisco, USA, 2013.
- F. LAFONT, J.F. BALMAT. Optimized fuzzy control of a greenhouse. **Fuzzy Sets Syst**. **128**, 47–59, 2002.
- J.K. GRUBER, J.L. GUZMÁN, F. RODRÍGUEZ, M. BERENGUEL, C. BORDÓNS. Nonlinear model predictive control of greenhouse temperature using a Volterra model. **In European Control Conference ECC'09**. pp. 1299–1304. Budapest, Hungary, 2009.

JOHNSON, M.A.; GRIMBLE, M.J.. Recent trends in linear optimal quadratic multivariable control system design. **IEEE Proceedings D - Control Theory And Applications**. v. 134, n. 1, p.53-71, jan. 1987.

JONES, Hamlyn G.. **Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology**. 3. ed. Dundee: Cambridge University Press, 2014. 407 p.

HAMEED , I. A.. Using the extended Kalman filter to improve the efficiency of greenhouse climate control. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control** 6(6), 2671–2680, 2010.

MCCULLAGH, James C.. **The Solar Greenhouse Book**. Emmaus: Rodale Press, 1978. 314 p.

MORAN, Michael J., SHAPIRO, Howard N., MUNSON, Bruce R., DEWITT, David P. **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos**. LTC, 2005.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013

PASGIANOS, G.D. et al. A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s.l.], v. 40, n. 1-3, p.153-177, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1699\(03\)00018-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1699(03)00018-8).

PONCE, P. et al. **Greenhouse Design and Control**. 1. ed. Leiden: CRC Press, 2014. 350 p.

REIS, N. V. B. dos. Construção de estufas para produção de hortaliças nas Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2005. 16 p. (Embrapa Hortaliças. Circular Técnica, 38).

RODRÍGUEZ, F. et al. **Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth**. 1. ed. Glasgow: Springer International Publishing, 2015. 250 p.

SEMENT J. S., MARTINEZ M.A., BLASCO X., SANCHIS J. MIMO predictive control of temperature and humidity inside a greenhouse using simulated annealing (SA) as optimizer of a multicriteria index. **Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence**. IEA/AIE 1998. Lecture Notes in Computer Science. v. 1416. Berlin: Springer, 1998.

TROFINO, Alexandre. Disciplina: **Controle Multivariavel (DAS-5131)**. Notas de Aula, 2015.

VADIEE, A.; MARTIN, V. Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 5087–5100, 2012.

VON ZABELTITZ, C. **Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates**. 1. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

ZENG, Songwei et al. Nonlinear Adaptive PID Control for Greenhouse Environment Based on RBF Network. **Sensors**. v. 12, n. 12, p.5328-5348, 26 abr. 2012. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s120505328>.