



INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS ALEXSANDER DE JESUS NOGUEIRA RODRIGUES

**IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADOR
FEEDFORWARD PARA MINIMIZAÇÃO DOS
EFEITOS DAS PERTURBAÇÕES EXTERNAS
DE UMA ESTUFA AGRÍCOLA**

João Pessoa - PB

2025

MATHEUS ALEXSANDER DE JESUS NOGUEIRA RODRIGUES

**IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADOR
FEEDFORWARD PARA MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS
DAS PERTURBAÇÕES EXTERNAS DE UMA ESTUFA
AGRÍCOLA**

Projeto Final de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba - IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

João Pessoa - PB

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

R696i	Rodrigues, Matheus Alessander de Jesus Nogueira. Implementação de controlador <i>feedforward</i> para minimização dos efeitos das perturbações externas de uma estufa agrícola / Matheus Alessander de Jesus Nogueira Rodrigues. – 2025. 41 f. : il. TCC (Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Controle e Processos Industriais / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025. Orientador: Prof. Dr. Moises Tavares da Silva. 1. Controle <i>feedforward</i>. 2. Estufa agrícola 3. Modelo de baixa ordem. 4. Eficiência energética. 5. Agricultura sustentável. I. Título. CDU 681.51(043)
-------	---

MATHEUS ALEXSANDER DE JESUS NOGUEIRA RODRIGUES

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADOR *FEEDFORWARD* PARA MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DAS PERTURBAÇÕES EXTERNAS DE UMA ESTUFA AGRÍCOLA

Projeto Final de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba - IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Trabalho aprovado. João Pessoa - PB, 18 de Julho de 2025:

BANCA EXAMINADORA:

(assinaturas eletrônicas via SUAP)

Dr. Moises Tavares da Silva
UFRPE (Orientador)

Dr. Ademar Gonçalves da Costa Junior
IFPB (Examinador Interno)

Dra. Anna Paula Virgolino de Andrade Aguiar
UFCG (Examinador Externo)

Dr. Icaro Bezerra Queiroz de Araujo
UFAL (Examinador Externo)

João Pessoa - PB
2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ademar Gonçalves da Costa Junior, COORDENADOR(A) - CD4 - EDIT-RE**, em 01/09/2025 11:29:17.
- **Matheus Alessander de Jesus Nogueira Rodrigues, ALUNO (20182610006) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 01/09/2025 11:35:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 22/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 753254
Verificador: 9c86959fe7
Código de Autenticação:



Documento assinado digitalmente



MOISES TAVARES DA SILVA
Data: 02/09/2025 13:54:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente



ICARO BEZERRA QUEIROZ DE ARAUJO
Data: 01/09/2025 22:10:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente



ANNA PAULA VIRGOLINO DE ANDRADE AGUIAR
Data: 02/09/2025 09:09:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Resumo

Este estudo investiga a implementação de controladores *feedforward* para minimizar os efeitos das perturbações climáticas em estufas agrícolas, com ênfase em regiões de clima adverso, como o Nordeste brasileiro. Trata-se de uma pesquisa aplicada que combina modelagem matemática, simulação computacional e análise comparativa de estratégias de controle. Foram avaliados diferentes métodos, incluindo abordagens clássicas e técnicas avançadas, como *Internal Model Control* (FF IMC) e *Closed-Loop* (FF CL), além de modelos não iterativos como *Generalized* (FF Gen) e *Low-order Feedforward Controller* (FF LFC) utilizando modelos FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) para representar a dinâmica térmica da estufa. Os resultados foram analisados por métricas de erros: IAE (*Integral Absolute Error*), ISE (*Integral Square Error*), ITAE (*Integral Time-Absolute Error*) e ITSE (*Integral Time-Square Error*) visando mostrar a melhor técnica orientada para determinada perturbação. As perturbações mensuráveis no sistema foram a temperatura externa, radiação solar e velocidade do vento de forma a analisar a temperatura interna dentro da estufa agrícola. A integração de controladores PI (Proporcional-Integrativo) com controlador *feedforward* demonstrou ser uma solução robusta, capaz de lidar eficientemente com as perturbações do sistema, contribuindo para a minimização das variações de temperatura e favorecendo uma potencial otimização energética e promoção de uma agricultura sustentável.

Palavras-chaves: Controle *feedforward*. Estufa agrícola. Modelo de baixa ordem. Eficiência energética. Agricultura sustentável.

Abstract

This study investigates the implementation of feedforward controllers to mitigate the effects of climatic disturbances in agricultural greenhouses, with a focus on regions with adverse weather conditions, such as the Brazilian Northeast. This applied research combines mathematical modeling, computational simulation, and comparative analysis of control strategies. Different methods were evaluated, including classical approaches and advanced techniques such as Internal Model Control (FF IMC) and Closed-Loop (FF CL), as well as non-iterative models like Generalized Feedforward (FF Gen) and Low-Order Feedforward Controller (FF LFC), all based on FOPDT (First Order Plus Dead Time) models to represent the thermal dynamics of the greenhouse. The results were analyzed using performance metrics such as IAE (Integral Absolute Error), ISE (Integral Square Error), ITAE (Integral Time-Absolute Error), and ITSE (Integral Time-Square Error) to identify the most suitable technique for each type of disturbance. The measurable disturbances considered in the system included external temperature, solar radiation, and wind speed, aiming to control the internal temperature of the greenhouse. The integration of PI(Proportional-Integral) controllers with feedforward control proved to be a robust solution, effectively handling system disturbances, minimizing temperature fluctuations, and contributing to potential energy optimization and promotion of sustainable agriculture.

Keywords: Feedforward control. Agricultural greenhouse. Low-order model. Energy efficiency. Sustainable agriculture.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de uma estufa agrícola em Nordestina, Bahia.	15
Figura 2 – Diagrama de blocos do controle <i>feedback</i>	17
Figura 3 – Diagrama de blocos do controle <i>feedforward</i>	18
Figura 4 – Diagrama de blocos do controle <i>feedforward</i> clássico.	21
Figura 5 – Diagrama de blocos do controle <i>feedforward</i> não iterativo.	22
Figura 6 – Esquemático das variáveis que afeta a temperatura interna da estufa .	23
Figura 7 – Curva das temperaturas interna x externa, realizada dia 06 de julho de 2021.	24
Figura 8 – Curva das temperaturas dentro da estufa, realizada dia 06 de julho de 2021.	24
Figura 9 – Diagrama de blocos do controle da temperatura interna da estufa . . .	26
Figura 10 – Valores de entrada adotado para o dia 6 de julho de 2021	29
Figura 11 – Curvas da temperatura interna e temperatura externa da estufa entre os dias 3 de julho e 7 de julho de 2021.	30
Figura 12 – Curvas das saídas dos modelos estimados	31
Figura 13 – Respostas de controle para a rejeição do tipo degrau que afetam a dinâmica da estufa.	33
Figura 14 – Respostas de controle para a rejeição do tipo rampa que afetam a dinâmica da estufa - Controladores <i>feedforward</i>	35
Figura 15 – Respostas de controle para a rejeição do tipo degrau que afetam a dinâmica da estufa - Controlador PI.	36
Figura 16 – Respostas de controle para a rejeição do tipo rampa que afetam a dinâmica da estufa - Controlador PI.	36

Lista de tabelas

Tabela 1	– Modelos FOPDT estimados para a estufa.	29
Tabela 2	– Controladores <i>feedforward</i> (FF) projetados para a estufa.	31
Tabela 3	– Índices de desempenho para as perturbações do tipo degrau.	34
Tabela 4	– Índices de desempenho para as perturbações do tipo rampa.	35

Lista de abreviaturas e siglas

FF	Controlador <i>feedforward</i>
FF CL	<i>Feedforward Closed-Loop</i>
FF Gen	<i>Feedforward Generalized</i>
FF IMC	<i>Feedforward Internal Model Control</i>
FF LFC	<i>Low-order Feedforward Controlled</i>
FOPDT	<i>First Order Plus Time Delay</i>
$I_{FF/FB}$	Índice de desempenho entre controladores <i>feedforward</i> e <i>feedback</i>
IAE	<i>Integral Absolute Error</i>
IMC	<i>Internal Model Control</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT	<i>Internet of things</i>
ISE	<i>Integral Square Error</i>
ITAE	<i>Integral Time-Absolute Error</i>
ITSE	<i>Integral Time-Square Error</i>
MIMO	<i>Multiple Input and Multiple Output</i>
P	Controlador Proporcional
PD	Controlador Proporcional-Derivativo
PFC	Projeto Final de Curso
PI	Controlador Proporcional-Integral
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
SII	<i>Sum of absolute Input Increments</i>
SISO	<i>Single Input and Single Output</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Motivação	11
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Sistemas de controle	15
2.1.1	Controlador PID	16
2.1.2	Controlador <i>Feedforward</i>	17
2.1.3	Índices de desempenho	18
3	METODOLOGIA	21
3.1	Modelo dinâmico da estufa agrícola	23
3.2	Regras de sintonia para o controlador <i>feedforward</i>	25
3.3	Modelo de baixa ordem	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	39

1 Introdução

1.1 Contextualização

As estufas agrícolas desempenham um papel fundamental na otimização do ambiente de cultivo, proporcionando condições ideais para o desenvolvimento das plantas. Ao reter o calor solar, essas estruturas oferecem proteção contra perturbações externas, como ventos e temperaturas extremas, além de permitirem o controle preciso da temperatura interna (SETHI; SHARMA, 2008).

No Nordeste brasileiro, o uso de estufas é especialmente relevante devido às condições climáticas adversas da região, marcada por clima semiárido, elevada radiação solar, baixos índices de umidade e chuvas irregulares. Essas características impõem limitações à produção agrícola, intensificadas pelos ventos de alta velocidade nas áreas litorâneas do Oceano Atlântico (REIS, 2005).

Nesse contexto, as estufas representam uma solução importante para proteger as plantas das condições climáticas adversas, além de fornecerem um ambiente controlado para o cultivo, contribuindo para a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico da região. Técnicas avançadas de controle climático, por exemplo, o controle multivariável de temperatura e umidade em estufas (GARCÍA-MAÑAS *et al.*, 2024), podem ser particularmente úteis para otimizar o uso de recurso limitados, como água e energia, em ambientes semiáridos.

Além disso, as estufas podem desempenhar um papel fundamental na promoção da sustentabilidade agrícola. A autocalibração de modelos dinâmicos da estufas integrada aos sistemas de controle, como os propostos por Elings *et al.* (2004), possibilita a aplicação precisa de água e nutrientes com base na demanda fisiológica das plantas, contribuindo para a redução de emissões ambientais e custos de produção. Neste caso, a autocalibração de modelos de cultivo, aliada ao uso de sensores em tempo real, permite ajustes dinâmicos na fertirrigação, garantindo que as quantidades aplicadas não excedam as necessidades da cultura.

1.2 Motivação

No Brasil, as estufas agrícolas desempenham um papel fundamental na adaptação às diversas condições climáticas regionais, oferecendo benefícios específicos em cada localidade. A região Nordeste enfrenta condições climáticas particularmente adversas durante a primavera e o verão, com temperaturas elevadas, baixa umidade relativa do ar e escassez

de recursos hídricos. Esses fatores, combinados com a alta incidência de radiação solar, prejudicam o desenvolvimento das culturas, uma vez que limitam os processos evaporativos e de evapotranspiração, essenciais para o crescimento vegetal (REIS, 2005). Nessas condições, as estufas agrícolas surgem como uma solução tecnológica crucial, pois não apenas protegem as plantas do estresse hídrico e térmico, mas também permitem um controle mais preciso das condições ambientais, como umidade e temperatura (PONCE *et al.*, 2014).

O alto consumo de energia associado ao funcionamento das estufas, especialmente em regiões de clima extremo como o Nordeste, torna indispensável a implementação de sistemas de controle multivariável eficientes. Esses sistemas são capazes de gerenciar simultaneamente múltiplos parâmetros, como temperatura interna, umidade, concentração de CO₂ e ventilação, garantindo condições ideais para o cultivo com o menor gasto energético possível (ZHANG *et al.*, 2022) (GARCÍA-MAÑAS *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a integração de tecnologias como sensores IoT (*Internet of things*), automação e inteligência artificial surge como uma estratégia fundamental para potencializar a eficiência desses sistemas de controle (PONCE *et al.*, 2014). Ao permitir a coleta e análise contínua de dados ambientais, essas tecnologias viabilizam ajustes dinâmicos nas condições internas da estufa em resposta às variações externas. Segundo Farooq *et al.* (2022), os avanços em IoT proporcionam soluções inteligentes capazes de automatizar parâmetros da estufa, como o monitoramento das plantas, o controle do ambiente interno e a irrigação, por meio da implantação de redes de sensores sem fio, que permitem a coleta e distribuição dos dados climáticos essenciais para a operação do sistema. Isso se torna possível à medida que, por exemplo, quando o ambiente da estufa não for adequado para o crescimento das plantas, o controlador deve enviar as informações para ajustar a umidade, a fim de ajustar os equipamentos da estufa, como sistemas de ventilação, aquecimento e sombreamento, de forma autônoma e em tempo real (WANG *et al.*, 2020).

O desenvolvimento de estratégias de controle avançado para estufas agrícolas é essencial para garantir produção eficiente e sustentável. Ao adaptar as tecnologias às particularidades regionais, é possível não apenas aumentar a produtividade, mas também reduzir impactos ambientais, promovendo uma agricultura mais resiliente às mudanças climáticas (MONTROYA-RÍOS *et al.*, 2020). Pesquisas contínuas e a adoção de inovações tecnológicas serão fundamentais para consolidar as estufas como pilares da agricultura do futuro.

Apesar dos avanços nas estratégias de controle aplicadas a estufas agrícolas, ainda persistem lacunas relevantes relacionadas à rejeição eficiente de perturbações externas em ambientes de clima semiárido. A maior parte dos estudos concentra-se em sistemas de controle multivariável ou em técnicas baseadas em inteligência artificial, que, embora apresentem alto desempenho, demandam infraestrutura computacional e tecnológica nem sempre acessível às realidades produtivas da agricultura de pequeno porte (FAROOQ *et*

al., 2022). Observa-se, portanto, que a aplicação de controladores *feedforward* — integrados a estratégias clássicas de controle e baseados em modelos FOPDT — constitui uma abordagem vantajosa, por oferecer simplicidade de implementação, menor custo e grande potencial de utilização em sistemas reais de automação agrícola (GUZMÁN *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir para o avanço da área por meio da implementação e análise de controladores *feedforward* aplicados ao controle térmico de uma estufa agrícola modelada a partir de FOPDT. A pesquisa propõe uma comparação sistemática entre diferentes regras de sintonia — clássica, Internal Model Control (IMC), Closed-Loop (CL), Generalized (Gen) e Low-Order Feedforward Controller (LFC) — avaliando seus desempenhos frente a perturbações mensuráveis, como temperatura externa, radiação solar e velocidade do vento. Dessa forma, este estudo oferece uma abordagem teórica, buscando um aprimoramento da estabilidade térmica interna e o fortalecimento de estratégias sustentáveis de controle climático em estufas agrícolas, especialmente nas condições adversas do Nordeste brasileiro.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste Projeto Final de Curso (PFC) é estudar e analisar estratégias de controle *feedforward* aplicadas para um modelo dinâmico de uma estufa agrícola. A implementação do controle *feedforward* visa antecipar e compensar as perturbações ambientais, como variações de temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar, oferecendo assim um ambiente otimizado para o crescimento do cultivar.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estabelecer um ambiente controlado para cultivo agrícola, superando as limitações impostas pelas variações climáticas regionais;
- Implementar diferentes técnicas de projeto para a estratégia de controle *feedforward*;
- Reduzir significativamente a influência das condições externas mediante mecanismos de ajuste dos parâmetros internos da estufa, garantindo assim a manutenção das condições ideais para o cultivo;
- Avaliar o desempenho operacional frente as perturbações externas, utilizando de índices de desempenho para uma análise quantitativa;
- Promover uma sustentabilidade agrícola mediante a aplicação de estratégias de controle.

2 Fundamentação teórica

As estufas agrícolas representam uma solução eficiente para aumentar a produtividade e qualidade dos cultivos. Ao proporcionar um ambiente controlado, permitem maior densidade de plantio comparado ao cultivo tradicional, elevando significativamente a produção. O controle preciso das condições internas garante produtos com características superiores, agregando valor de mercado e competitividade aos agricultores (CAMPAGNOL; MELLO; PINHEIRO, 2015).

As estufas também promovem práticas agrícolas mais sustentáveis. Ao limitar a exposição das plantas a fatores externos, reduzem a necessidade de defensivos químicos - especialmente em climas tropicais, onde a proliferação de pragas é intensa. Além de proteger as culturas contra condições adversas, as estufas otimizam o desenvolvimento vegetal e minimizam a incidência de doenças (SHAMSHIRI *et al.*, 2018). A possibilidade de produção durante todo o ano é outro destaque das estufas agrícolas. Independentemente da estação ou do clima da região, é possível cultivar uma ampla variedade de plantas, incluindo espécies que normalmente não seriam adequadas ao ambiente local, o que amplia as oportunidades de diversificação para o agricultor (RODRIGUES, 2015).

A região Nordeste do Brasil é carente de modelos de estufas adaptadas às suas condições climáticas características. Um dos modelos mais comuns é o teto em arco formato raso em parábola invertida com flecha, conforme ilustrado na Figura 1. Esse modelo favorece a aerodinâmica, proporcionando maior resistência a ventos fortes e melhor distribuição da carga. Além disso, auxilia no escoamento da água da chuva e na captação uniforme da luz solar, otimizando a fotossíntese e o controle térmico interno (REIS, 2005).

As estufas agrícolas estão sujeitas a diversas perturbações externas que afetam o ambiente interno, e consequentemente, o crescimento das plantas. Entre os principais fatores destacam-se as mudanças climáticas, ventos fortes, variações na radiação solar, flutuações na umidade do solo e contaminação do ar. Como o controle de cada parâmetro ambiental eleva os custos de produção, um projeto eficiente de controle torna-se fundamental (PONCE *et al.*, 2014).

Nesse contexto, compreender a influência desses fatores externos sobre o microclima interno das estufas é essencial para garantir o desempenho produtivo das culturas. As mudanças climáticas, por exemplo, modificam as temperaturas externas, os índices de precipitação e a umidade relativa do ar, podendo ocasionar estresse térmico nas plantas. Ventos fortes podem danificar a estrutura da estufa e interferir na circulação de ar em seu interior, enquanto variações na radiação solar impactam diretamente os processos fotossintéticos e o regime térmico. Da mesma forma, alterações na umidade do solo

Figura 1 – Exemplo de uma estufa agrícola em Nordestina, Bahia.



Fonte: [TROPICAL ESTUFAS](#)

comprometem a disponibilidade de água e nutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal, e a presença de contaminantes atmosféricos pode afetar a saúde das plantas, reduzindo a produtividade. Diante desses desafios, o uso de soluções tecnológicas adequadas e sistemas de controle eficientes tornam-se indispensáveis para o sucesso da agricultura protegida ([RODRÍGUEZ et al., 2008](#)).

2.1 Sistemas de controle

Para garantir um ambiente estável e favorável ao crescimento das plantas dentro de estufas agrícolas, é crucial monitorar e controlar as perturbações externas. Isso pode ser alcançado por meio de sistemas de controle que empregam técnicas consolidadas, como controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ([DORF; BISHOP, 2011](#))([OGATA, 2009](#)), e estratégias de *feedback-feedforward* ([GUZMÁN; HÄGGLUND, 2024](#)).

A implementação de estratégias de controle é essencial para minimizar os efeitos adversos dessas perturbações e manter as condições ideais para o cultivo agrícola. A dinâmica térmica de estufas pode ser simplificada e representada por FOPDT, a fim de facilitar o projeto de controladores e estratégias de compensação de perturbações ([MONTROYA-RÍOS et al., 2020](#)). Estes modelos são descritos por uma função de transferência que considera o ganho K ; a constante de tempo τ_p e o tempo morto τ_d conforme apresentado na Equação (2.1).

$$G(s) = \frac{K}{\tau_p s + 1} e^{-\tau_d s} \quad (2.1)$$

Esses parâmetros são determinados experimentalmente e variam conforme o projeto da estufa e as condições externas.

2.1.1 Controlador PID

Diversas estratégias podem ser utilizadas para alcançar um ambiente controlado em estufas agrícolas. Uma dessas abordagens é o uso de modelos FOPDT, associados a controladores PID para o ajuste automático das variáveis de interesse. Como demonstrado por [Montoya-Ríos *et al.* \(2020\)](#), [Garcia-Manas *et al.* \(2021\)](#) e [Guzmán e Hägglund \(2024\)](#), essa abordagem utiliza os parâmetros característicos do modelo — ganho do processo, constante de tempo e tempo morto — para representar o comportamento do sistema. A partir desse modelo, é possível projetar controladores PID independentes responsáveis pelo controle eficiente de cada saída do sistema, mesmo na presença de perturbações externas.

Conforme ilustrado na Equação (2.2), a ação proporcional (P) produz uma resposta imediata e diretamente proporcional ao erro instantâneo na malha fechada. A ação integral (I) atua acumulando o erro ao longo do tempo, eliminando o erro residual persistente e garantindo que a saída do sistema alcance e mantenha a referência desejada, mesmo diante de perturbações externas. Já a ação derivativa (D) antecipa a evolução futura do erro, baseando-se na sua taxa de variação temporal, o que contribui para a melhoria da estabilidade do sistema e para uma resposta dinâmica mais rápida e precisa ([FRANKLIN *et al.*, 2002](#)).

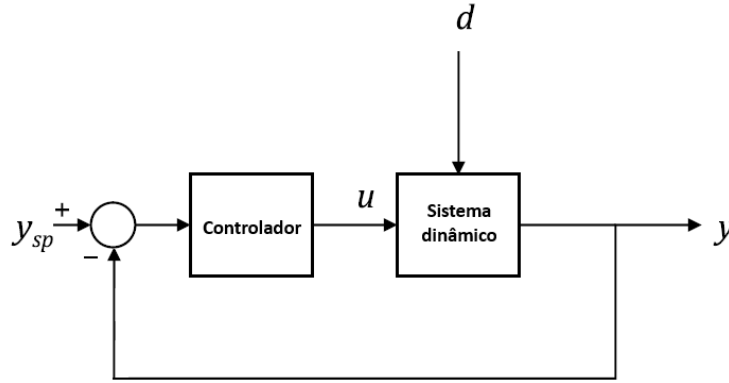
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

onde, K_p é o ganho proporcional; K_i é o ganho integrativo; K_d é o ganho derivativo; e é o erro; t é o tempo; τ é o tempo de integração; e $u(t)$ é o saída do controlador.

Para reduzir o erro da variável de processo e garantir um controle preciso e mais estável, os controladores PID operam em malha fechada, como ilustrado na Figura 2, comparando continuamente a variável do processo (y) com o *setpoint* (y_{sp}) e ajustando a saída de controle (u) por meio de um malha de realimentação ([GARCIA, 2021](#)). Esse mecanismo é essencial para corrigir desvios causados por perturbações (d) e manter a estabilidade do sistema, especialmente em ambientes sujeitos a variações externas.

O ajuste dos ganhos K_p , K_i e K_d do controlador desempenha um papel fundamental nesse processo, pois define a capacidade do sistema de responder dinamicamente a perturbações, melhorando a resposta a variações bruscas e contribuindo para a manutenção de um ambiente controlado com maior eficiência ([FRANKLIN *et al.*, 2002](#)).

Embora um controlador PID possua três termos de controle (Proporcional, Integral e Derivativo), muitas aplicações requerem apenas um ou dois desses termos para um controle eficaz. Essa adaptação é realizada definindo como zero os parâmetros não utilizados,

Figura 2 – Diagrama de blocos do controle *feedback*.

Fonte: elaborado pelo autor

resultando em diferentes configurações de controladores (OGATA, 2009). Os principais controladores encontrados são os seguintes:

- Controlador Proporcional (P);
- Controlador Proporcional-Integral (PI);
- Controlador Proporcional-Derivativo (PD);
- Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

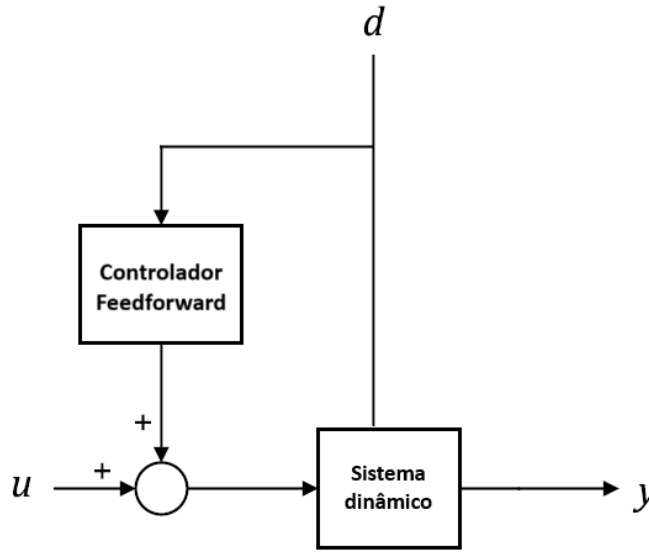
Comumente, os ganhos K_i e K_d são substituídos por K_p/T_i e $K_p T_d$, respectivamente, onde T_i é o tempo de integração e T_d é o tempo derivativo. A lei de controle resultante é dada pela Equação (2.3).

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.3)$$

2.1.2 Controlador *Feedforward*

O diagrama de blocos do controle *feedforward*, apresentado na Figura 3, mostra um sistema com perturbações mensuráveis em um sistema em malha aberta. O controlador *feedforward* é uma técnica que antecipa e compensa possíveis perturbações externas antes que elas afetem a saída do sistema (GUZMÁN; HÄGGLUND, 2024). Diferentemente do controlador *feedback* onde a saída do sistema é comparada com a referência desejada, e a diferença entre as variáveis é utilizada para ajustar o sistema dinâmico (OGATA, 2009), o *feedforward* atua de forma preventiva.

Para sistemas complexos como estufas agrícolas, a combinação *feedback-feedforward* desempenha um papel crucial. Enquanto o *feedforward* compensa as perturbações mensuráveis principais (como radiação solar e temperatura externa), o *feedback* atua de forma

Figura 3 – Diagrama de blocos do controle *feedforward*.

Fonte: elaborado pelo autor

corretiva, garantindo que a variável controlada (temperatura interna) mantenha-se próxima do valor desejado mesmo na presença de perturbações não mensuráveis ou incertezas do modelo (GUZMÁN; HÄGGLUND, 2024).

2.1.3 Índices de desempenho

Um das formas de analisar um sistema de controle, é avaliar o desempenho dos controladores por meio de métricas de erro. Como descrito em Hu *et al.* (2011), a integral do erro é comumente utilizado como uma boa medida para o desempenho do sistema sendo frequentemente empregados no projeto de sistemas de controle.

Essas métricas quantificam a eficiência do sistema em minimizar desvios entre os valores desejados e os medidos, permitindo ajustes precisos nos parâmetros do controlador (SOUZA *et al.*, 2007). As métricas utilizadas neste trabalho foram:

- **IAE (*Integral Absolute Error*)**

A integral do valor absoluto do erro, conforme apresentado em (HÄGGLUND, 1995), é uma métrica fundamental para detecção de perturbações em malhas de controle. Ela mede a soma acumulada do erro ao longo do tempo, como descrito na Equação (2.4). Este índice é especialmente útil tanto para estudos de simulação computacional (DORF; BISHOP, 2011) quanto para o monitoramento contínuo de desempenho em sistemas industriais (HÄGGLUND, 1995).

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (2.4)$$

O limite superior T é definido como um tempo finito escolhido de maneira a garantir que a integral aproxime adequadamente do valor de regime permanente (DORF; BISHOP, 2011).

- **ISE (*Integral Square Error*)**

A integral do erro quadrático é um índice de desempenho que fornece peso adicional para penalizar erros maiores e descontar erros menores (SANGEETHA *et al.*, 2023). Este índice consiste na soma acumulada do erro elevado ao quadrado ao longo do tempo, conforme descrito pela Equação (2.5).

$$ISE = \int_0^T e(t)^2 dt \quad (2.5)$$

- **ITAE (*Integral Time Absolute Error*)**

Para reduzir a influência de erros iniciais de grande magnitude e priorizar erros que persistem no regime transitório (DORF; BISHOP, 2011), utiliza-se a integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro, conforme descrita pela Equação (2.6).

$$ITAE = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt \quad (2.6)$$

- **ITSE (*Integral Time Square Error*)**

A integral do tempo multiplicado pelo erro quadrático pode representar bem as especificações de saída no domínio no tempo (HU *et al.*, 2011). Como exibido na Equação (2.7), o ITSE combina o índice ISE ponderado no tempo.

$$ITSE = \int_0^T t \cdot e(t)^2 dt \quad (2.7)$$

- **SII (*Sum of Absolute Input Increments*)**

A Soma dos Incrementos Absolutos da Entrada é uma métrica que quantifica a variação total do esforço de controle ao longo do tempo, refletindo diretamente a suavidade da ação de controle. Esta avaliação é particularmente relevante em contextos práticos, uma vez que variações abruptas no sinal de controle podem comprometer a vida útil dos atuadores, além de poderem exigir dinâmicas além da capacidade física dos mesmos em alguns casos (TORGA *et al.*, 2022). Matematicamente, o SII pode ser definido pela Equação (2.8):

$$SII = \sum_{k=0}^T |u(k) - u(k-1)| \quad (2.8)$$

onde, $u(k)$ representa o sinal de controle no instante discreto k ; T é o número total de amostras no horizonte de simulação.

- **$I_{FF/FB}$ (Índice de desempenho entre controladores *feedforward* e *feedback*)**

O desempenho das regras de sintonia implementadas para os controladores *feedforward* depende dos parâmetros da função de transferência do sistema dinâmico, da função de transferência da perturbação e do valor da constante de tempo para malha fechada (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021).

??) propõem uma estratégia que consiste em definir um *benchmark* que represente o desempenho desejado, com ou sem o controlador *feedforward*, permitindo uma medição quantitativa para comparações entre regras e esquemas de controle *feedforward*. A estrutura para a quantificação desse índice é proposto pela Equação (2.9).

$$I_{FF/FB} = 1 - \frac{IAE_{FF}}{IAE_{FB}} \quad (2.9)$$

onde IAE_{FB} e IAE_{FF} representam a IAE obtido pelo controlador de *feedback* e pelo controlador de *feedforward*, respectivamente. Ambos mensurados a partir do sinal de perturbação (d), como ilustrados nas Figuras 2 e 3.

O índice apresentado na Equação (2.9) possui uma interpretação direta. Quando o controlador *feedforward* remove completamente a resposta à perturbação, tem-se $IAE_{FF} = 0$, e o índice se reduz a $I_{FF/FB} = 1$. Enquanto o *feedforward* melhora o controle, ou seja, quando $IAE_{FF} < IAE_{FB}$, o índice é positivo e situa-se na faixa $0 < I_{FF/FB} \leq 1$. Por outro lado, um valor negativo para o índice ocorre quando $IAE_{FF} > IAE_{FB}$, indicando que o projeto *feedforward* não trouxe benefício para o processo de controle (GUZMÁN; HÄGGLUND, 2024).

3 Metodologia

Embora os controladores por realimentação possam ser sintonizados para atenuar os efeitos das perturbações, tais estratégias de controle apresentam limitações, de modo que a remoção adequada do efeito da perturbação não pode ser garantida. Por essa razão, a inclusão de um *feedforward* em um esquema de controle ajuda a melhorar a rejeição da ação das perturbações (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2006). Em termos gerais, a finalidade de um sistema de controle *feedforward* é antecipar e compensar o efeito de perturbações mensuráveis antes que elas causem resultados indesejados na saída do processo (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021).

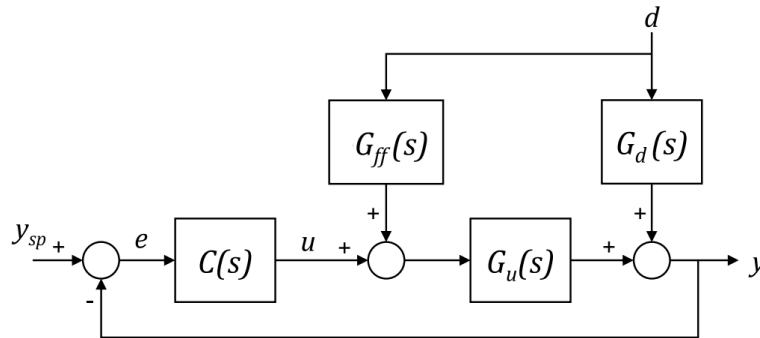
Ao analisar um sistema em malha aberta, o controlador *feedforward* ideal $G_{ff}(s)$, pode ser calculado através de um esquema de controle *feedforward* clássico, em conjunto com um controlador de *feedback* representado por $C(s)$, conforme demonstrado na Figura 4, logo:

$$y(s) = d \times G_d(s) + [d \times G_{ff}(s) + u] \times G_u(s) \quad (3.1)$$

$$y(s) = d \times [G_d(s) + G_{ff}(s) \times G_u(s)] + u \times G_u(s) \quad (3.2)$$

onde, $G_u(s)$ representa a função de transferência que relaciona a saída do processo y para o sinal de controle u e $G_d(s)$ é a função de transferência que relaciona a perturbação mensurável d à saída do processo.

Figura 4 – Diagrama de blocos do controle *feedforward* clássico.



Fonte: adaptado Garcia-Manas *et al.* (2021).

O propósito do controlador *feedforward* é neutralizar o efeito da perturbação na saída do processo, assegurando que a variável controlada (y) seja influenciada exclusivamente pela variável manipulada (u). Para atingir esse objetivo, o termo inicial associado à perturbação (d) na Equação (3.2) deve ser anulado, resultando na Equação (3.3). Ao isolar a variável do controlador *feedforward*, obtém-se a função de transferência apresentada na Equação (3.4), a qual, quando adicionada ao sistema de controle, contribui para a eliminação do efeito da perturbação na saída.

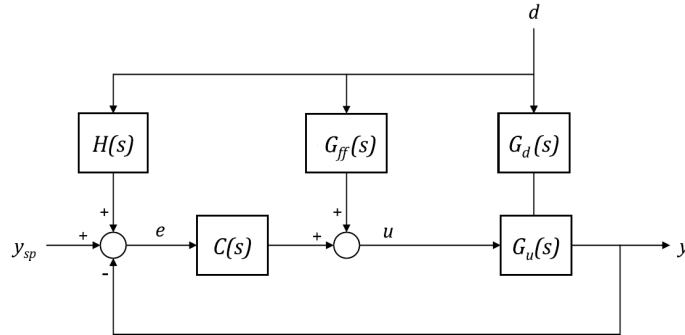
$$G_d(s) + G_{ff}(s) \times G_u(s) = 0 \quad (3.3)$$

O controlador *feedforward* é calculado para remover o efeito da perturbação que afeta a saída do processo. No entanto, o controlador *feedforward* ideal apresentado na Equação (3.4) pode ser irrealizável se o atraso em $G_u(s)$ for maior que o atraso em $G_d(s)$. No esquema clássico, exibido na Figura 4, esse problema é resolvido removendo o atraso em $G_{ff}(s)$. No esquema não iterativo, ilustrado na Figura 5, é obtido com a inclusão de um filtro $H(s)$ determinado através da Equação (3.5). Neste caso, o efeito das perturbações mensuráveis é removido do erro de *feedback*, fazendo com que o controlador de *feedback* e o controlador *feedforward* possam ser ajustados individualmente (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021). Além disso, problemas de realização podem surgir devido aos valores dos polos e zeros em $G_u(s)$ e $G_d(s)$ (RODRÍGUEZ *et al.*, 2014). Com isso, o controlador *feedforward* pode ser reduzido a um ganho estático (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2006).

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_u(s)} \quad (3.4)$$

$$H(s) = G_d(s) - G_{ff}(s) \times G_u(s) \quad (3.5)$$

Figura 5 – Diagrama de blocos do controle *feedforward* não iterativo.



Fonte: adaptado Garcia-Manas *et al.* (2021).

De forma a permitir uma comparação apropriada, todas as regras de sintonia para o controlador *feedforward* foram aplicadas a um modelo FOPDT, conforme descrito nas Equações (3.6)-(3.8). Para o controlador PI, houve o ajuste dos parâmetros empregando o método lambda, conforme demonstrado por Guzmán e Hägglund (2024), e descrito na Equação (3.9), onde λ é a constante de tempo desejada em malha fechada. Embora λ seja um parâmetro de ajuste livre, recomenda-se selecioná-lo de acordo com a Equação (3.10), a fim de garantir que todos os polos em malha fechada sejam reais e, assim, evitar respostas oscilatórias (GUZMÁN; HÄGGLUND, 2024).

$$G_u(s) = \frac{k_u}{\tau_u s + 1} e^{-L_u s} \quad (3.6)$$

$$G_d(s) = \frac{k_d}{\tau_d s + 1} e^{-L_d s} \quad (3.7)$$

$$G_{ff}(s) = k_{ff} \frac{\tau_z s + 1}{\tau_p s + 1} e^{-L_{ff} s} \quad (3.8)$$

$$T_i = \tau_u; \quad k_p = \frac{\tau_u}{k_u(L_u + \lambda)} \quad (3.9)$$

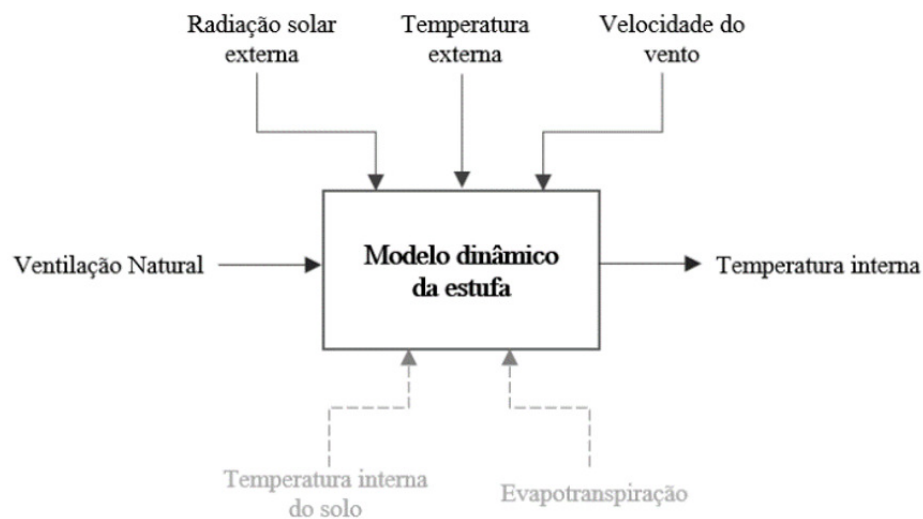
$$\lambda > (0,5 + \sqrt{2})L_u \quad (3.10)$$

As variáveis do processo são definidas da seguinte maneira: k_u e k_d representam os ganhos; τ_u , τ_d são as constantes de tempo; L_u e L_d são os atrasos que relacionam o sinal de controle e à perturbação definidas pelos subíndices u e d , respectivamente. Por outro lado, k_{ff} representa o ganho do controlador *feedforward*, L_{ff} , τ_z e τ_p são definidas de acordo com a regra de sintonia.

3.1 Modelo dinâmico da estufa agrícola

A representação esquemática do modelo dinâmico da estufa agrícola, apresentada na Figura 6, destaca as principais variáveis que influenciam diretamente o microclima interno da estrutura. As variáveis de entrada consideradas no sistema incluem a radiação solar, a temperatura externa, a velocidade do vento e a ventilação natural, enquanto a temperatura interna do ar constitui a principal variável de saída analisada.

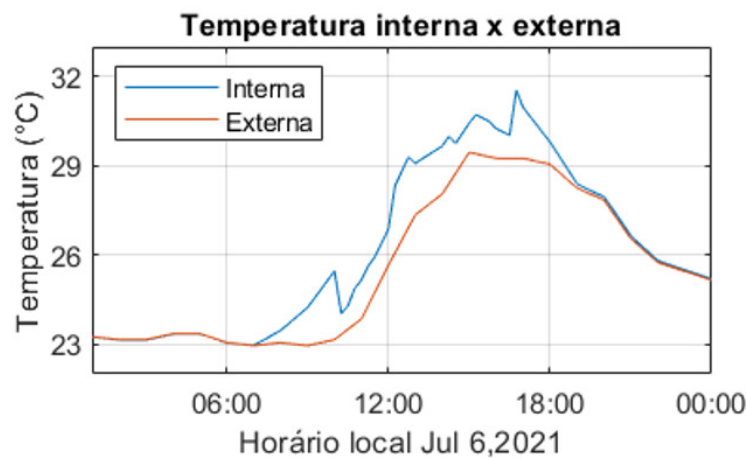
Figura 6 – Esquemático das variáveis que afeta a temperatura interna da estufa



Fonte: adaptado de [Garcia-Manas et al. \(2021\)](#)

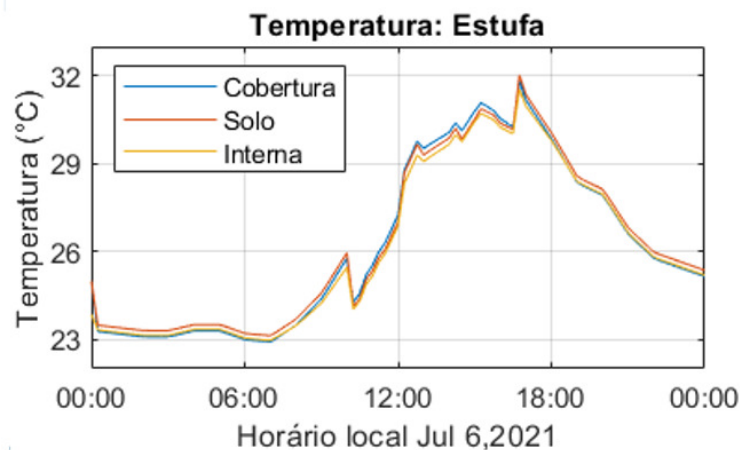
A simulação do modelo da estufa agrícola adotado foi realizada utilizando o software Matlab/Simulink®, conforme apresentado em [Silva et al. \(2022\)](#). As variáveis de entrada do modelo dinâmico simulado são a radiação solar (em W/m²), temperatura externa (em °C), e velocidade do vento (em m/s), tendo a temperatura interna (T_i , em °C) como a principal variável do modelo dinâmico. Com isso, a partir dos resultados obtidos com base no levantamento de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), da estação A320 localizada na cidade de João Pessoa, Paraíba ([SILVA et al., 2022](#)), as Figuras 7 e 8 apresentam o comportamento estimado da temperatura para uma estufa agrícola.

Figura 7 – Curva das temperaturas interna x externa, realizada dia 06 de julho de 2021.



Fonte: dados da pesquisa

Figura 8 – Curva das temperaturas dentro da estufa, realizada dia 06 de julho de 2021.



Fonte: dados da pesquisa

Os resultados da simulação, apresentados nas Figuras 7 e 8, validaram o comportamento esperado do modelo dinâmico ilustrado na Figura 6. Esse desempenho é justificado pelo fato de a temperatura interna do solo ser considerada uma variável de resposta mais lenta em relação às perturbações climáticas externas, com influência predominante nos

períodos noturnos. Embora a evapotranspiração também afete o clima interno, ela é tratada como uma perturbação não mensurável no modelo, sendo suas variações compensadas pela ação do controlador de *feedback* (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021).

Na Figura 6, são representadas algumas variáveis que influenciam a temperatura interna do ar dentro da estufa. No âmbito da rejeição de perturbações em uma estufa, surgem desafios devido às condições meteorológicas externas, que podem ser consideradas perturbações mensuráveis afetando a evolução do clima interno. Essa abordagem sistemática permitiu uma análise detalhada das interações entre as variáveis do modelo, reforçando a robustez da estratégia de controle implementada face às condições dinâmicas e variáveis externas.

Foram aplicadas perturbações do tipo degrau e rampa, visando analisar seus impactos na saída do processo. Com isso, pode-se avaliar a resposta do sistema a diferentes tipos de perturbações, fornecendo percepções sobre a dinâmica e a capacidade de controle da estufa em condições variáveis. Essa diferenciação nas características das perturbações é crucial para compreender como diferentes fatores climáticos afetam a estufa de maneiras distintas. Ao ajustar o sistema de controle em resposta a esses dois tipos de perturbações, é possível aprimorar a capacidade da estufa em lidar eficientemente com variações ambientais, promovendo um ambiente estável e propício ao cultivo.

As perturbações do tipo degrau geralmente são caracterizadas como variações bruscas na radiação solar e na velocidade do vento, desencadeadas, por exemplo, pela passagem de nuvens ou por alguma outra obstrução sobre a estufa. Por outro lado, as perturbações do tipo rampa apresentam uma evolução gradual e progressiva ao longo tempo, sendo normalmente associadas à variação da temperatura externa.

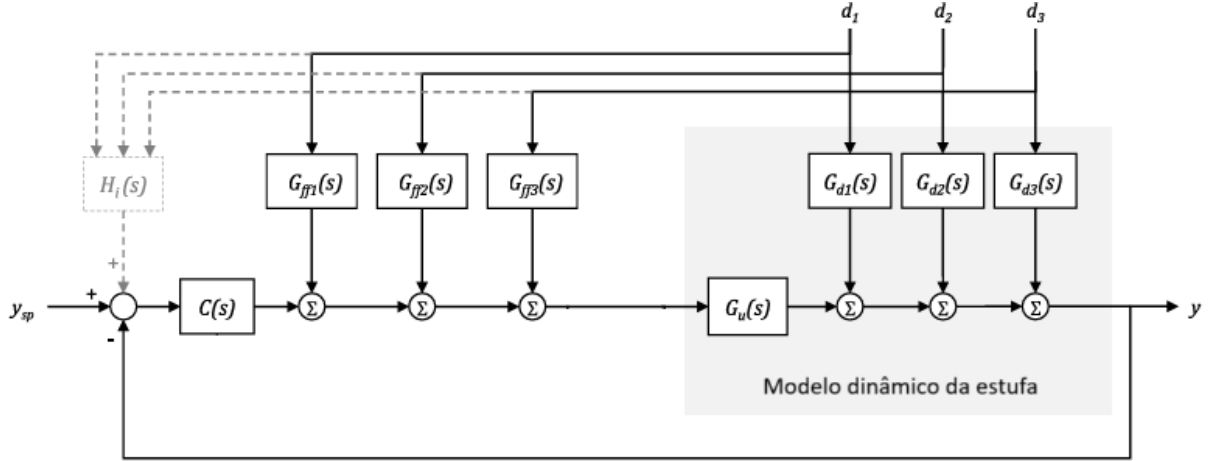
A partir do modelo da estufa agrícola, foram realizadas simulações para avaliar o desempenho da estratégia de controle proposta em relação ao modelo de dinâmica da estufa para controlar a temperatura interna do ar, conforme destacado na Figura 9. As três perturbações externas consideradas são a radiação solar (d_1), a velocidade do vento (d_2) e a temperatura externa (d_3).

3.2 Regras de sintonia para o controlador *feedforward*

Neste trabalho, foram utilizadas quatro regras de sintonia para o controlador *feedforward*, além do método clássico. Todas foram aplicadas com o objetivo de avaliar a capacidade de rejeição de perturbações externas na estufa agrícola.

- **Regra de sintonia IMC (*Internal Model Control*) (FF IMC):** essa regra é deduzida para minimizar o valor do índice ISE ajustando apenas o parâmetro

Figura 9 – Diagrama de blocos do controle da temperatura interna da estufa



Fonte: adaptado de Garcia-Manas *et al.* (2021)

do ganho do controlador k_{ff} (RODRÍGUEZ *et al.*, 2020). Esta regra consiste nos seguintes passos:

1. Definir $\tau_z = \tau_u$ e $\tau_p = \tau_d$
2. Calcular o ganho do controlador k_{ff} como:

$$k_{ff} = \frac{k_d}{k_u} e^{-\frac{L_u - L_d}{\tau_n - \tau_d}} \quad (3.11)$$

onde τ_n é um parâmetro da sintonia. Esse parâmetro pode ser igual a λ se um controlador PI for selecionado como controlador de *feedback* e seus parâmetros podem ser calculados a partir do método *lambda*.

3. Fim da regra.

- **Regra de sintonia *Closed-Loop* (FF CL):** o modelo adotado neste trabalho para o sintonia do controle visa minimizar o IAE promovendo um ajuste dinâmico no ganho do controlador *feedforward* (VERONESI *et al.*, 2017). Esta regra consiste nos seguintes passos:

1. Definir $\tau_z = \tau_u$ e $\tau_p = \tau_d$
2. Calcular o ganho do controlador k_{ff} como:

$$k_{ff} = \frac{k_d(\tau_d + L_d)}{k_u(\tau_d + L_u)}. \quad (3.12)$$

3. Fim da regra.

- **Regra de sintonia generalizada (FF Gen):** a regra generalizada pode obter três tipos diferentes de controladores *feedforward*, dependendo da escolha feita na Etapa

3. Para este trabalho, a opção de minimização de ISE foi selecionada, permitindo adaptar o desempenho do controlador conforme as necessidades específicas do sistema de controle (RODRÍGUEZ *et al.*, 2013). Esta regra consiste nos seguintes passos:

1. Definir $k_{ff} = k_d/k_u$, $\tau_z = \tau_u$ e $L_{ff} = \max(0, L_d - L_u)$
2. Calcular $L_b = L_u - L_d$.
3. Calcular α dependendo do comportamento desejado.

$$\alpha = \begin{cases} \frac{L_b}{2\tau_d(1-\sqrt{e^{-(L_b/\tau_d)}})} & \text{agressivo (minimização ISE)} \\ 1,7 & \text{moderado (minimização IAE)} \\ 4 & \text{conservador (remoção de overshoot)} \end{cases}$$

4. Definir τ_p de acordo como:

$$\tau_p = \begin{cases} \tau_d & L_b \leq 0 \\ \tau_d - \frac{L_b}{\alpha} & 0 < L_b < 4\tau_d \\ 0 & L_b \geq 4\tau_d \end{cases}$$

Se $\tau_p = 0$, selecione um valor próximo de zero, para ter controlador realizável

5. Definir $H(s)$, conforme a Equação (3.5) para esquema não iterativo.
6. Fim da regra.

- **Regra de sintonia para controladores *feedforward* de baixa ordem (FF LFC):** esta regra de sintonia visa minimizar o ISE limitando os picos no sinal de controle (HAST; HÄGGLUND, 2014). Esta regra consiste nos seguintes passos:

1. Calcular $L = L_u - L_d$.
2. Se $L < 0$, definir $L_{ff} = 0$.
3. Definir $k_{ff} = k_d/k_u$
4. Calcular a e b como:

$$a = \tau_u/\tau_d; \quad b = a(a+1)e^{L/\tau_d} \quad (3.13)$$

5. Calcular τ_p como:

$$\tau_p = \begin{cases} \frac{3a-1-b+(a-1)\sqrt{1+4b}}{b-2}\tau_d & \text{se } b < 4a^2 - 2a \text{ ou } b < a + \sqrt{a} \\ 0 & \text{, caso contrário} \end{cases}$$

6. Calcular τ_z como:

$$\tau_z = (\tau_p + \tau_u)\left(1 - \frac{2\tau_u}{b(\tau_d + \tau_p)}\right) \quad (3.14)$$

7. Se $\tau_p = 0$, o controlador *feedforward* é acrescentado um filtro passa baixa de segunda ordem como segue:

$$G_{ff} = k_{ff} \frac{\tau_z s + 1}{(\tau_f s + 1)^2} e^{-L_{ff}s} \quad (3.15)$$

onde τ_f é a constante de tempo do filtro. Para obter um sinal de controle com um pico de valor Δ (sendo $\Delta > 1$), τ_f deve ser calculado pela seguinte expressão:

$$\tau_f = \frac{\tau_z}{1 + \frac{1}{W_0(\frac{\Delta-1}{e-1})}} \quad (3.16)$$

onde W_0 é o ramo principal da função de LambertW ([CORLESS et al., 1996](#)).

8. Definir $H(s)$, conforme a Equação (3.5) para esquema não iterativo.
9. Fim da regra.

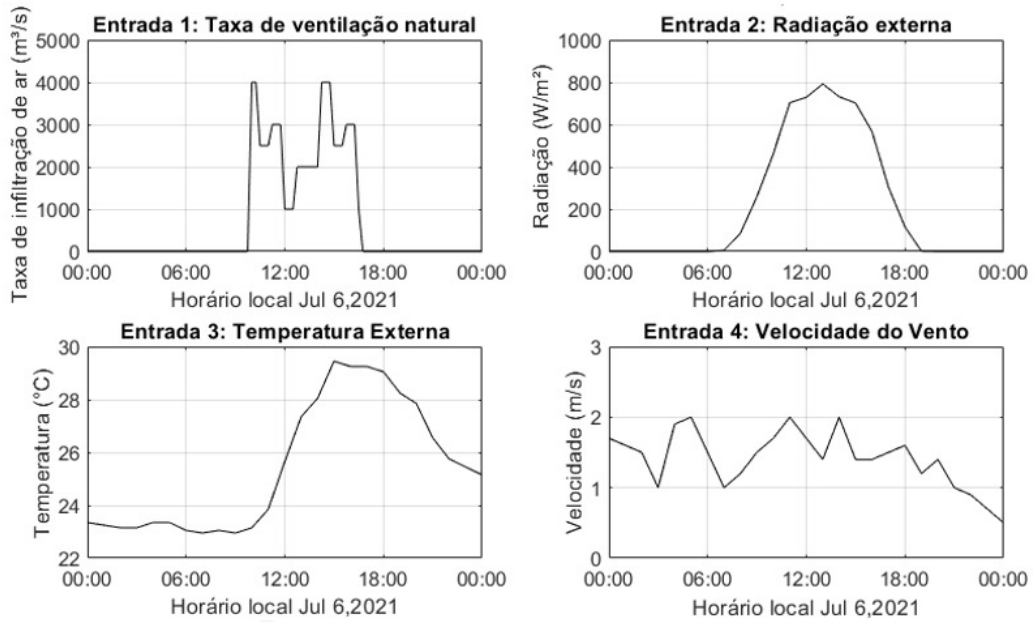
3.3 Modelo de baixa ordem

A metodologia para estimação do modelo de baixa, conforme descrita em [Montoya-Ríos et al. \(2020\)](#), foi sistematizada em três etapas principais para obtenção de modelos de baixa ordem representativos da dinâmica da estufa:

1. Resposta ao degrau: inicialmente, foi obtida a resposta ao degrau da saída do processo, proporcionando uma visão do comportamento dinâmico em reação a mudanças abruptas;
2. Identificação de funções de transferência: as funções de transferência de baixa ordem foram identificadas, utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados para extrair modelos matemáticos que capturam as características fundamentais da dinâmica da estufa;
3. Cálculo de controladores: com base nos modelos de baixa ordem obtidos, foram calculados os controladores *feedback* e *feedforward*. Esses controladores desempenham um papel crucial na capacidade de rejeição do sistema diante de perturbações.

Um conjunto de dados meteorológicos coletados no dia 6 de julho de 2021 foi selecionado para a identificação dos modelos, utilizando o módulo de Identificação de Sistemas do software Matlab®. As variáveis de entrada adotadas para essa etapa são ilustradas na Figura 10. A escolha desse dia, dentre o intervalo de 3 a 7 de julho, deve-se ao fato de apresentar um perfil contínuo de variação da temperatura interna da estufa em função da temperatura externa, sem a interferência de ações de controle, como mostrado na Figura 11.

Figura 10 – Valores de entrada adotado para o dia 6 de julho de 2021



Fonte: dados da pesquisa

A Tabela 1 apresenta as funções de transferências dos modelos identificados e calculados para o dia 6 de julho de 2021 para a dinâmica da estufa, com base no algoritmo de mínimos quadrados. Os valores de constante de tempo e os atrasos são expressos em segundos. Perturbação (d_1) é a radiação solar externa, perturbação (d_2) é a temperatura externa e a perturbação (d_3) é a velocidade do vento.

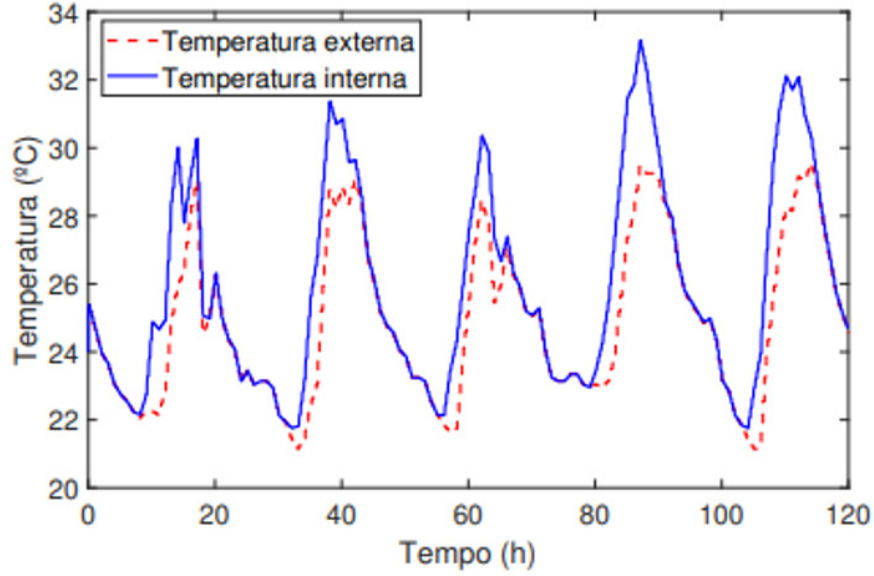
Tabela 1 – Modelos FOPDT estimados para a estufa.

	Unidades	Função de transferência
$G_u(s)$	$\left[\frac{^{\circ}C}{\%}\right]$	$\frac{-0,0011}{27912s + 1}e^{-3250s}$
$G_{d1}(s)$	$\left[\frac{^{\circ}C}{m/s}\right]$	$\frac{0,003133}{20942s + 1}e^{-3523s}$
$G_{d2}(s)$	$\left[\frac{^{\circ}C}{^{\circ}C}\right]$	$\frac{-0,04731}{35205s + 1}$
$G_{d3}(s)$	$\left[\frac{^{\circ}C}{W/m^2}\right]$	$\frac{0,71531}{20606s + 1}e^{-10800s}$

Fonte: dados da pesquisa

Embora os valores obtidos representem a dinâmica do processo, conforme ilustrado na Figura 12, a validade desses modelos lineares para um sistema não linear, como uma estufa, pode depender das condições operacionais. Assim, é necessário identificar novos modelos para diferentes estados do cultivo e épocas do ano, adaptando-os às variações climáticas locais (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021).

Figura 11 – Curvas da temperatura interna e temperatura externa da estufa entre os dias 3 de julho e 7 de julho de 2021.



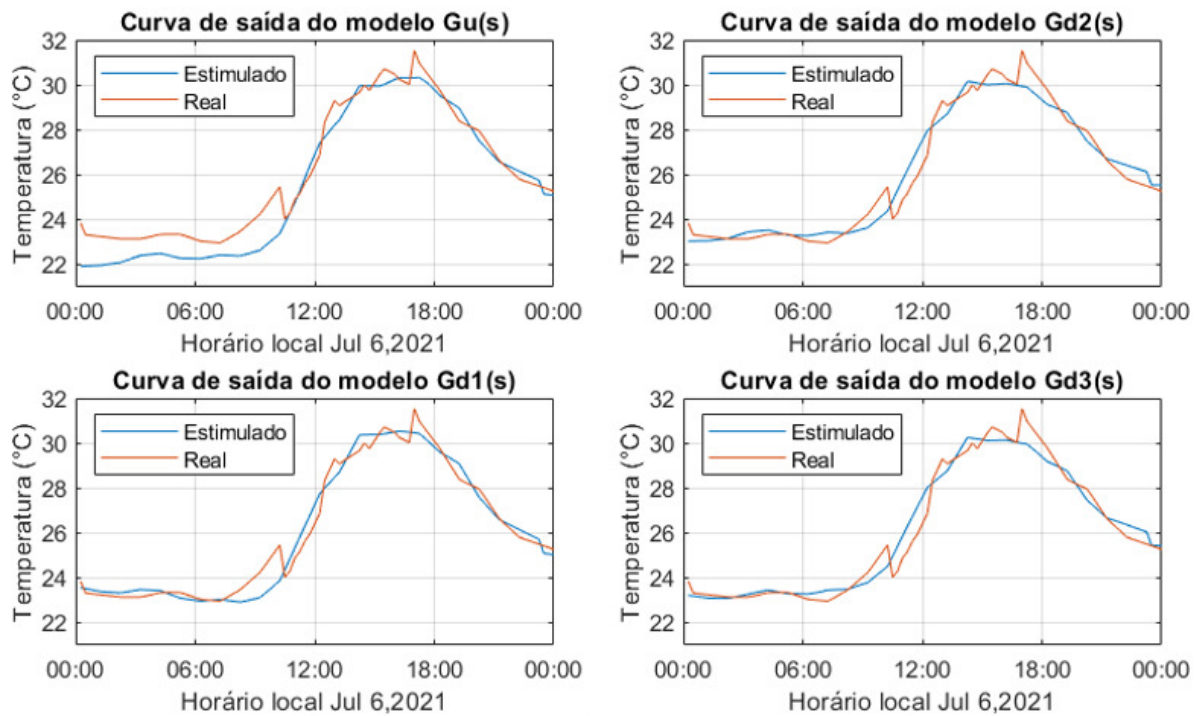
Fonte: Silva *et al.* (2022)

O controlador de *feedback* ($C(s)$) foi projetado como um controlador proporcional-integral (PI) utilizando o método de sintonia λ aplicado à função de transferência do processo $G_u(s)$. O parâmetro de ajuste foi definido como $\lambda = 0,3\tau_u$, conforme estabelecido em (3.10), resultando em um valor de 8373,6 s. Esta escolha permite ao controlador compensar eficientemente as perturbações não mensuráveis e incertezas decorrentes de erros de modelagem (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021).

Os parâmetros obtidos para o controlador PI foram $k_p = -2183$ e $T_i = 27912$ s. Os controladores *feedforward* projetados - que incluem os métodos clássico (FF Clássico), *closed-loop* (FF CL), *Internal Model Control* (FF IMC), e os métodos não iterativos *Generalized Feedforward* (FF Gen) e *Low-Order Feedforward* (FF LFC) - estão detalhados na Tabela 2, conforme desenvolvido na Seção 3.2.

Segundo Garcia-Manas *et al.* (2021), uma vez que as funções de transferência que descrevem a dinâmica da estufa apresentam problema da inversão de atraso não realizável, todos os controladores *feedforward* são ajustados sem o tempo de atraso.

Figura 12 – Curvas das saídas dos modelos estimados



Fonte: dados da pesquisa

Tabela 2 – Controladores *feedforward* (FF) projetados para a estufa.

	Radiação externa (G_{ff1})	Temperatura externa (G_{ff2})	Velocidade do vento (G_{ff3})
FF clássico	$\frac{7,951 \cdot 10^4 s + 2849}{2,094 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{-1,2 \cdot 10^6 - 43,01}{3,52 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{1,815 \cdot 10^7 s + 650,3}{2,061 \cdot 10^4 s + 1}$
FF CL	$\frac{8,025 \cdot 10^4 s + 2875}{2,094 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{-1,114 \cdot 10^6 s - 39,91}{3,52 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{2,355 \cdot 10^7 s + 843,8}{2,061 \cdot 10^4 s + 1}$
FF IMC	$\frac{8,041 \cdot 10^4 s + 2881}{2,094 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{-1,099 \cdot 10^6 s - 39,37}{3,52 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{2,39 \cdot 10^7 s + 856,1}{2,061 \cdot 10^4 s + 1}$
FF Gen	$\frac{7,951 \cdot 10^4 s + 2849}{2,094 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{-1,2 \cdot 10^6 s - 43,01}{3,203 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{1,815 \cdot 10^7 s + 650,3}{2,061 \cdot 10^4 s + 1}$
FF LFC	$\frac{8,31 \cdot 10^4 s + 2,849}{2,238 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{-2,312 \cdot 10^6 s - 43,01}{5,887 \cdot 10^4 s + 1}$	$\frac{1,26 \cdot 10^8 s + 650,3}{1,919 \cdot 10^5 s + 1}$

Fonte: dados da pesquisa

4 Resultados e discussões

A dinâmica da estufa foi simulada utilizando as funções de transferência, apresentadas na Tabela 1. Aqui, todos os gráficos apresentados nas Figuras 13 a 16, representam uma rejeição as perturbações considerando um *setpoint* fixo. As amplitudes das perturbações foram calculadas para gerar um desvio unitário da saída do processo em malha aberta.

Para destacar o desempenho das regras de sintonia dos controladores *feedforward*, as respostas do controlador PI foram excluídas dos gráficos principais, uma vez que seu comportamento na rejeição de perturbações não foi satisfatório. Além disso, as respostas em degrau foram analisadas considerando todas as regras de sintonia, tanto no esquema de controle clássico quanto no não interativo, projetados conforme a Tabela 2. Já para as respostas em rampa, foram analisadas somente as regras de sintonia para o esquema de controle clássico.

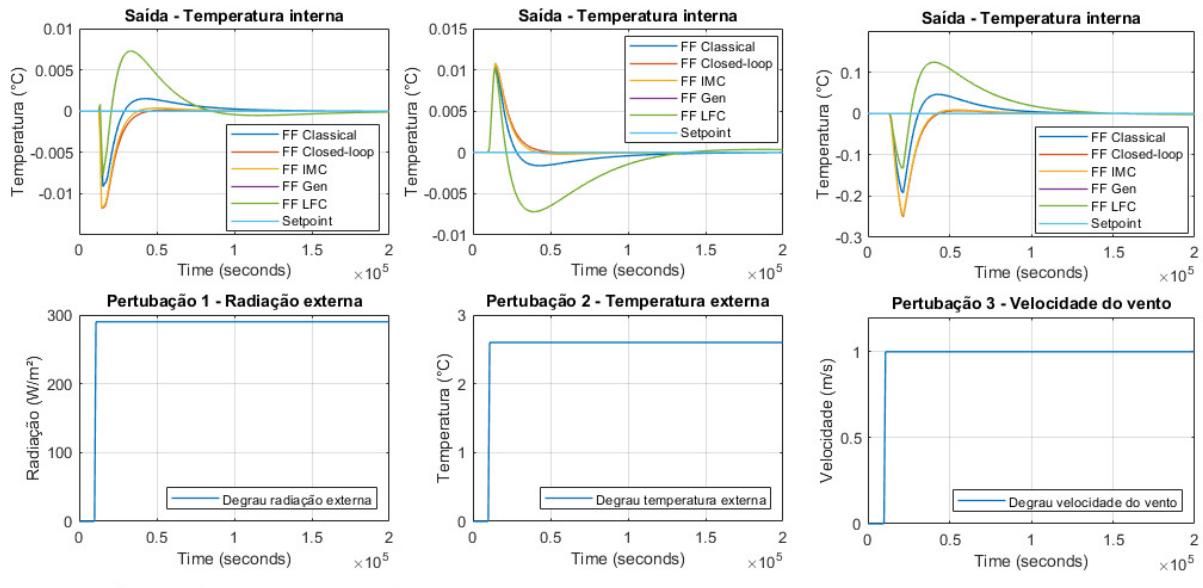
A Figura 13 apresenta as respostas para rejeição de perturbações em degrau, com índices listados na Tabela 3. Verifica-se que técnicas como FF IMC e FF CL proporcionam desempenho superior ao método clássico, com menores IAE e ITAE, enquanto estratégias não interativas como FF Gen e FF LFC resultam em respostas mais lentas.

A análise do SII revela que o PI manteve o controle mais suave (menor SII), enquanto FF CL e FF IMC exibiram os maiores valores, corroborando sua atuação mais agressiva. Este compromisso era esperado, pois a rejeição mais rápida de perturbações (menor IAE/ITAE) requer ações de controle mais energéticas (maior SII). O FF LFC, com resposta mais lenta, apresentou SII intermediário, equilibrando parcialmente desempenho e suavidade.

Os resultados referentes à regra de sintonia FF Gen foram excluídos das análises de perturbações, radiação externa e velocidade do vento, pois essa regra não apresenta modificações adicionais significativas no comportamento do sistema em comparação ao método clássico de controle *feedforward*. Sua formulação busca generalizar as soluções tradicionais, mas, na prática, quando aplicada sem considerar atrasos negativos — que são inexistentes ou inviáveis —, ela se comporta de forma equivalente ao modelo clássico, sem oferecer vantagens adicionais no contexto estudado. Assim, optou-se por simplificar a análise, concentrando-se nas abordagens que de fato proporcionam alterações relevantes no desempenho do sistema.

No caso das perturbações em rampa, ilustradas na Figura 14 e quantificadas pelos índices de desempenho da Tabela 4, apenas o esquema *feedforward* clássico rejeitou completamente a perturbação, enquanto as demais técnicas apresentaram erro em regime permanente. Essa diferença ocorre porque as regras baseadas em malha fechada modificam

Figura 13 – Respostas de controle para a rejeição do tipo degrau que afetam a dinâmica da estufa.



Fonte: dados da pesquisa

o ganho do *feedforward*, comprometendo seu acompanhamento de sinais não estacionários — uma limitação que reforça o uso de controladores de *feedback* de ordem superior nesses cenários (GARCIA-MANAS *et al.*, 2021).

Quanto à suavidade do controle, verifica-se que o PI manteve o menor SII também para rampas, refletindo novamente o perfil de controle mais suave. No entanto, essa característica está diretamente associada à sua resposta insatisfatória na rejeição da perturbação. Entre as estratégias de *feedforward*, os valores de SII foram similares, com o método clássico registrando geralmente os menores índices. Isso indica que a eliminação do erro em regime permanente pelo *feedforward* clássico não exige um esforço de controle notavelmente mais abrupto que as demais variantes, reforçando sua vantagem para perturbações rampa.

Essa vantagem é confirmada pelo índice $I_{FF/FB}$, que atribuiu os melhores resultados ao método clássico para perturbações em rampa. Para degraus, entretanto, o FF IMC se destacou, embora FF CL e FF IMC tenham apresentado valores de $I_{FF/FB}$ satisfatórios também para rampas, considerando sua limitação inerente de não eliminar completamente o erro em regime permanente.

As Figuras 15 e 16 trazem um paralelo sobre a eficácia do controlador *feedforward* em relação ao controlador PI, evidenciando que, embora o PI seja capaz de atenuar parcialmente os efeitos das perturbações, sua atuação isolada resulta em maiores índices de erro e maior tempo de acomodação.

No geral, os resultados indicam que a escolha da estratégia *feedforward* deve

Tabela 3 – Índices de desempenho para as perturbações do tipo degrau.

Perturbação: radiação externa						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	SII	$I_{FF/FB}$
PI	10560	1934	$4,58 \cdot 10^8$	$6,74 \cdot 10^7$	993.5	-
FF clássico	153,7	0,72	$5,64 \cdot 10^6$	$1,54 \cdot 10^4$	1370	0,9854
FF CL	128	0,98	$2,90 \cdot 10^6$	$1,81 \cdot 10^4$	1395	0,9879
FF IMC	124,6	0,90	$3,09 \cdot 10^6$	$1,65 \cdot 10^4$	1390	0,9882
FF LFC	173,1	0,96	$5,84 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$	1321	0,9836
Perturbação: temperatura externa						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	SII	$I_{FF/FB}$
PI	1421	23,76	$7,54 \cdot 10^7$	$9,29 \cdot 10^5$	111.7	-
FF clássico	171	0,717	$7,36 \cdot 10^6$	$1,49 \cdot 10^4$	136.7	0,8797
FF CL	124,1	0,829	$2,61 \cdot 10^6$	$1,44 \cdot 10^4$	125.4	0,9127
FF IMC	124	0,791	$3,04 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^4$	127	0,9127
FF Gen	183,5	0,847	$7,61 \cdot 10^6$	$1,75 \cdot 10^4$	148.5	0,8709
FF LFC	187,1	0,905	$7,57 \cdot 10^6$	$1,86 \cdot 10^4$	159.1	0,8683
Perturbação: velocidade do vento						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	SII	$I_{FF/FB}$
PI	8312	1212	$4,18 \cdot 10^8$	$5,08 \cdot 10^7$	1199	-
FF clássico	3323	268,8	$1,34 \cdot 10^8$	$7,15 \cdot 10^6$	2705	0,5877
FF CL	3146	475,2	$8,68 \cdot 10^7$	$1,07 \cdot 10^7$	3182	0,6215
FF IMC	3111	456,1	$8,78 \cdot 10^7$	$1,02 \cdot 10^7$	3153	0,6257
FF LFC	3516	292,3	$1,36 \cdot 10^8$	$7,75 \cdot 10^6$	2457	0,5676

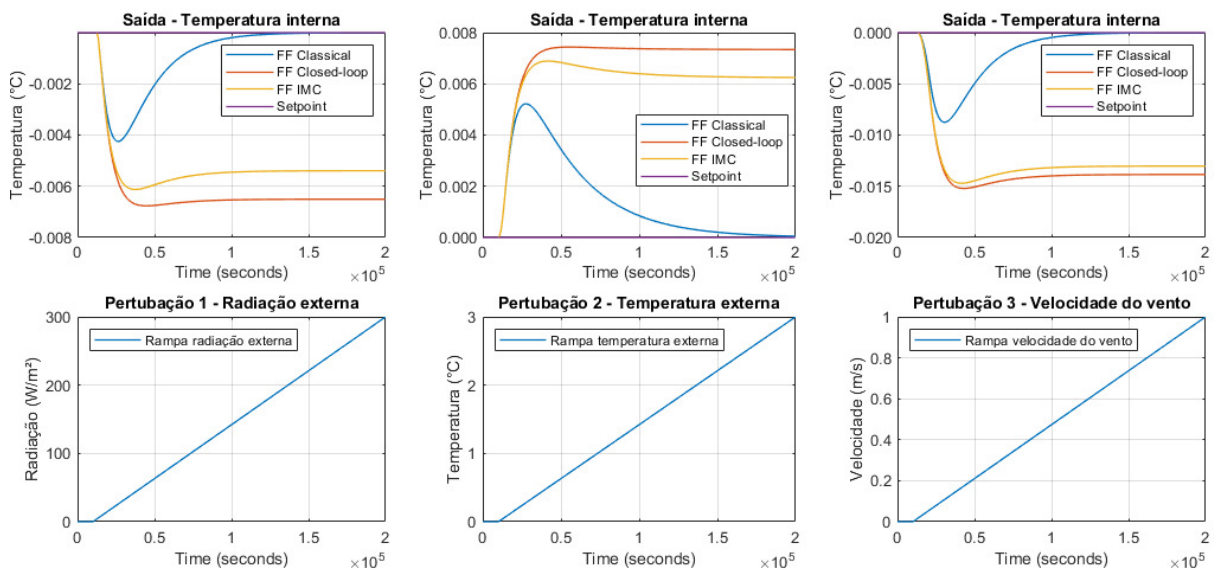
Fonte: dados da pesquisa

considerar a natureza da perturbação e a importância relativa entre suavidade do controle e desempenho de rastreamento. Para perturbações em degrau, métodos baseados em malha fechada (FF IMC, FF CL) oferecem melhor desempenho dinâmico à custa de um maior SII, significando ações de controle mais abruptas. Para cenários com rampas, o esquema clássico se mostra mais eficaz e, embora todos os métodos feedforward tenham SII similares neste caso, o clássico se destaca por eliminar o erro permanente. O controlador PI, por outro lado, oferece a ação mais suave (SII consistentemente mais baixo) em todos os cenários, porém com a desvantagem de uma rejeição de perturbação significativamente inferior. Assim, a decisão final deve ponderar a criticidade do desgaste do atuador (relacionado ao SII) contra a necessidade de rápida rejeição de perturbações e precisão em regime permanente.

Tabela 4 – Índices de desempenho para as perturbações do tipo rampa.

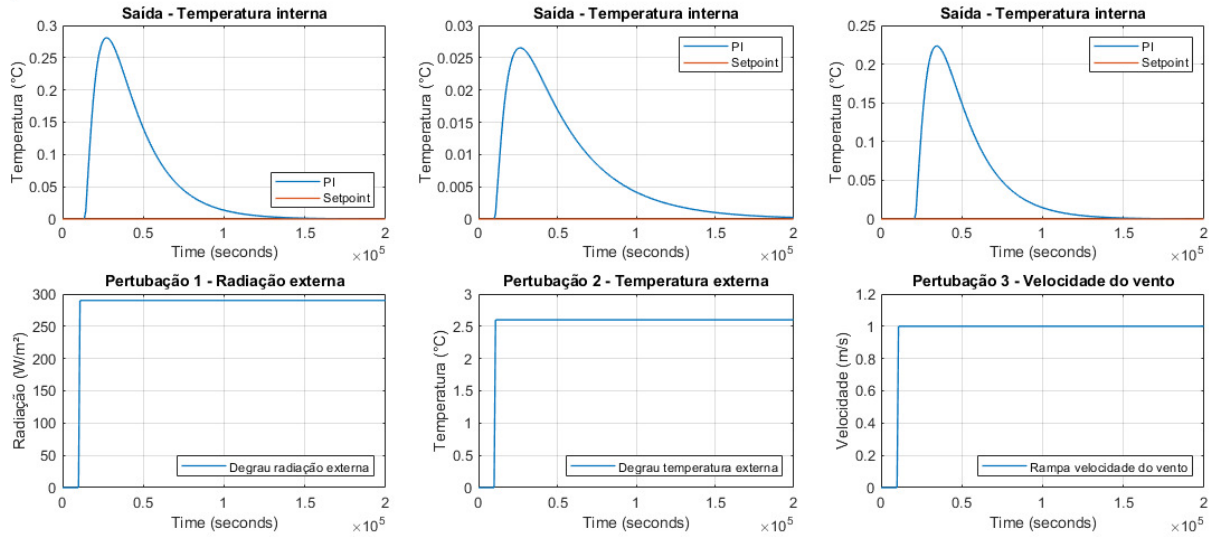
Perturbação: radiação externa						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	SII	$I_{FF/FB}$
PI	9027	481	$1,08 \cdot 10^9$	$6,02 \cdot 10^7$	827.4	-
FF clássico	15,73	0,004	$6,70 \cdot 10^5$	146,3	879.7	0,9983
FF CL	118	0,076	$1,29 \cdot 10^7$	8403	880.3	0,9869
FF IMC	100,5	0,055	$1,08 \cdot 10^7$	5900	880.2	0,9888
Perturbação: temperatura externa						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	SII	$I_{FF/FB}$
PI	1271	9,674	$1,56 \cdot 10^8$	$1,26 \cdot 10^6$	117.7	-
FF clássico	28,04	0,009	$1,52 \cdot 10^6$	371	125.5	0,9779
FF CL	133,1	0,096	$1,45 \cdot 10^7$	$1,07 \cdot 10^4$	124.9	0,8953
FF IMC	117,4	0,075	$1,26 \cdot 10^7$	7995	125	0,9076
Perturbação: velocidade do vento						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	SII	$I_{FF/FB}$
PI	6565	265,5	$8,09 \cdot 10^8$	$3,41 \cdot 10^7$	605.9	-
FF clássico	330,3	1,87	$1,52 \cdot 10^7$	$7,09 \cdot 10^4$	645.7	0,9497
FF CL	2513	35,09	$2,76 \cdot 10^8$	$3,85 \cdot 10^6$	658.3	0,6172
FF IMC	2383	31,53	$2,60 \cdot 10^8$	$3,43 \cdot 10^6$	657.3	0,6370

Fonte: dados da pesquisa

Figura 14 – Respostas de controle para a rejeição do tipo rampa que afetam a dinâmica da estufa - Controladores *feedforward*.

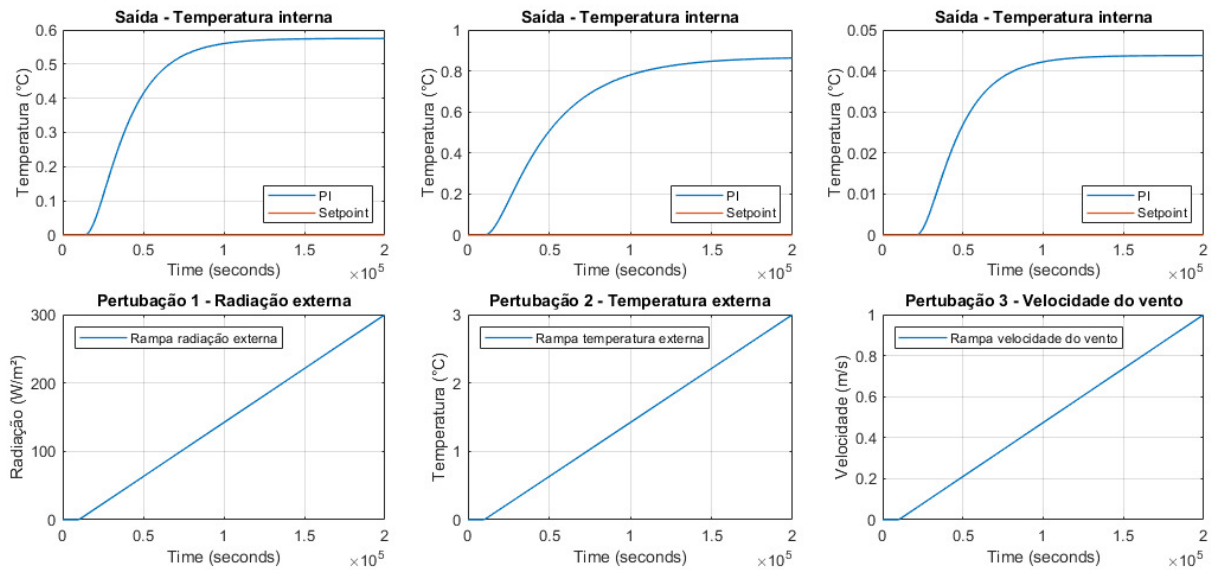
Fonte: dados da pesquisa

Figura 15 – Respostas de controle para a rejeição do tipo degrau que afetam a dinâmica da estufa - Controlador PI.



Fonte: dados da pesquisa

Figura 16 – Respostas de controle para a rejeição do tipo rampa que afetam a dinâmica da estufa - Controlador PI.



Fonte: dados da pesquisa

5 Conclusão

Este trabalho apresentou a implementação de um controlador *feedforward* para minimizar os efeitos das perturbações externas em estufas agrícolas, com foco na estabilização da temperatura interna. A abordagem aplicada demonstrou ser tecnicamente viável e eficaz, especialmente em regiões com condições climáticas adversas, como o Nordeste brasileiro, onde são frequentes variações bruscas de temperatura, radiação solar e velocidade do vento.

Embora tenha demonstrado a viabilidade técnica da aplicação de controladores *feedforward*, este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas. A modelagem simplificada via FOPDT não contempla todas as não linearidades presentes na dinâmica real de uma estufa, e a ausência de validação experimental impede a avaliação dos efeitos de ruídos e incertezas operacionais. Tais aspectos delimitam o escopo prático dos resultados e sinalizam oportunidades para estudos futuros.

Os resultados destacam que a escolha da técnica de controle *feedforward* para estufas agrícolas deve ser orientada pela natureza predominante das perturbações e pelas métricas apropriadas. Em particular, o trabalho evidenciou que métodos baseados em malha fechada, especialmente o FF IMC, apresentaram os melhores índices IAE e ITAE para perturbações do tipo degrau, promovendo uma resposta eficiente e com menor erro acumulado, o que se traduz em maior estabilidade térmica interna — um fator crucial para a otimização do crescimento das plantas. Por outro lado, para perturbações do tipo rampa, o esquema clássico exibiu superioridade, evidenciando que, em cenários de variações graduais, abordagens mais simples podem superar técnicas avançadas, que, neste caso, apresentaram erro em regime permanente devido à modificação do ganho do controlador. Portanto, a implementação de um sistema de controle *feedforward* eficaz exige uma análise cuidadosa das características específicas das perturbações climáticas locais, a fim de garantir a máxima eficiência no sistema de cultivo.

A utilização de modelos FOPDT permitiu uma simplificação matemática adequada, facilitando o projeto dos controladores. No entanto, a validade desses modelos lineares em sistemas não lineares, como estufas, depende das condições operacionais, reforçando a necessidade de ajustes para diferentes épocas do ano e de adaptação contínua aos estágios de cultivo. Além disso, a integração de controladores PI com estratégias *feedforward* mostrou-se essencial. O controle *feedforward* compensa as principais perturbações mensuráveis, enquanto o PI garante a rejeição de perturbações não mensuráveis e a robustez frente às incertezas do modelo. O método de sintonia lambda, aplicado ao controlador PI, garantiu robustez ao sistema, mesmo em cenários dinâmicos.

Em termos de sustentabilidade, o uso de técnicas de controle capazes de rejeitar perturbações pode potencialmente contribuir para uma operação mais eficiente das estufas, favorecendo a otimização dos recursos. Os resultados indicam que a capacidade de manter condições de cultivo mais estáveis frente às variações climáticas externas reforça o potencial das estufas automatizadas como uma alternativa promissora para melhorar a produtividade agrícola.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a validação experimental das estratégias de *feedforward* analisadas, permitindo avaliar sua robustez frente a variabilidades e perturbações reais não modeladas. Adicionalmente, o desenvolvimento de modelos não lineares que representem com maior fidelidade a dinâmica da estufa pode viabilizar a implementação de controladores com ganhos programados em função de variáveis operacionais, ampliando assim a aplicabilidade e a eficiência dos sistemas de controle.

Referências

- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Advanced PID control. ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.
- CAMPAGNOL, R.; MELLO, S. d. C.; PINHEIRO, R. R. Olericultura: cultivo em ambiente protegido. 2015.
- CORLESS, R. M. *et al.* On the lambert w function. *Advances in Computational mathematics*, Springer, v. 5, p. 329–359, 1996.
- DORF, R.; BISHOP, R. Modern control systems. 2011.
- ELINGS, A. *et al.* Feed-forward control of water and nutrient supply in greenhouse horticulture: development of a system. *Acta Horticulturae*, p. 195–204, 2004.
- FAROOQ, M. S. *et al.* Internet of things in greenhouse agriculture: a survey on enabling technologies, applications, and protocols. *IEEE access*, IEEE, v. 10, p. 53374–53397, 2022.
- FRANKLIN, G. F. *et al.* Feedback control of dynamic systems. 2002.
- GARCIA, C. Controle de processos industriais: estratégias convencionais. Editora Blucher, 2021.
- GARCIA-MANAS, F. *et al.* Experimental evaluation of feedforward tuning rules. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 114, p. 104877, 2021.
- GARCÍA-MAÑAS, F. *et al.* A practical solution for multivariable control of temperature and humidity in greenhouses. *European Journal of Control*, Elsevier, v. 77, p. 100967, 2024.
- GUZMÁN, J. L.; HÄGGLUND, T. *Feedforward Control: Analysis, Design, Tuning rules, and Implementation*. Alemanha: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2024.
- GUZMÁN, J. L. *et al.* Performance indices for feedforward control. *Journal of process control*, Elsevier, v. 26, p. 26–34, 2015.
- HÄGGLUND, T. A control-loop performance monitor. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 3, n. 11, p. 1543–1551, 1995.
- HAST, M.; HÄGGLUND, T. Low-order feedforward controllers: Optimal performance and practical considerations. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 24, n. 9, p. 1462–1471, 2014.
- HU, H. *et al.* Multi-objective control optimization for greenhouse environment using evolutionary algorithms. *Sensors*, v. 11, n. 6, p. 5792–5807, 2011.
- MONTROYA-RÍOS, A. P. *et al.* Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. *Agronomy*, MDPI, v. 10, n. 9, p. 1327, 2020.

- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- PONCE, P. *et al.* *Greenhouse design and control*. London, UK: CRC press, 2014.
- REIS, N. V. dos. Construção de estufas para produção de hortaliças nas Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. 2005.
- RODRIGUES, P. Cooperação prevê avanços tecnológicos no cultivo protegido de hortaliças. *Hortaliças em Revista*, Embrapa Hortaliças, v. 4, n. 17, p. 7–9, 2015.
- RODRÍGUEZ, C. *et al.* Revisiting the simplified internal model control tuning rules for low-order controllers: feedforward controller. *IET Control Theory & Applications*, v. 14, n. 12, p. 1612–1618, 2020.
- RODRÍGUEZ, C. *et al.* Optimal feedforward compensators for systems with right-half plane zeros. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 368–374, 2014.
- RODRÍGUEZ, C. *et al.* Generalized feedforward tuning rules for non-realizable delay inversion. *Journal of Process Control*, v. 23, n. 9, p. 1241–1250, 2013.
- RODRÍGUEZ, F. *et al.* Adaptive hierarchical control of greenhouse crop production. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, v. 22, n. 2, p. 180–197, 2008.
- SANGEETHA, S. *et al.* Performance analysis of buck converter with fractional pid controller using hybrid technique. *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier, v. 169, p. 104515, 2023.
- SETHI, V.; SHARMA, S. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar energy*, Elsevier, v. 82, n. 9, p. 832–859, 2008.
- SHAMSHIRI, R. *et al.* Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, v. 32, p. 287–302, 2018.
- SILVA, E. T. A. *et al.* Análise e simulação do modelo dinâmico de uma estufa agrícola. *Sociedade Brasileira de Automática*, 2022.
- SOUZA, D. L. d. *et al.* Análise do desempenho de sistemas de controle. Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- TORGA, D. S. *et al.* Simultaneous tuning of cascade controllers based on nonlinear optimization. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 44, n. 16, p. 3118–3131, 2022.
- VERONESI, M. *et al.* Closed-loop tuning rules for feedforward compensator gains. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 7523–7528, 2017.
- WANG, J. *et al.* Data communication mechanism for greenhouse environment monitoring and control: An agent-based iot system. *Information Processing in Agriculture*, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 444–455, 2020.

ZHANG, M. *et al.* Energy-saving design and control strategy towards modern sustainable greenhouse: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 164, p. 112602, 2022.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Matheus Alexsander
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Matheus Alexsander de Jesus Nogueira Rodrigues, ALUNO (20182610006) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 03/11/2025 16:27:22.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/11/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1659396

Código de Autenticação: a5ff2cde02

