

Controlo Digital PID da Humidade Interior com Ventilação Simulada

João Ferreira[□]

PT

Abstract. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema digital inteligente para regular a HR. No coração do sistema está um microcontrolador ESP32 que, através de um sensor SHT41, mede continuamente a HR e a temperatura. Como nem sempre é viável instalar um sistema de ventilação físico para testes, a ação de controlo de um ventilador foi simulada com base num modelo matemático que descreve as trocas de ar. Implementámos um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para ajustar esta ventilação simulada, com o objetivo de manter a humidade num nível confortável e saudável (definido como setpoint). A performance do sistema foi testada de duas formas: primeiro, observando como o PID reage a mudanças reais de humidade no ambiente, e depois, numa simulação pura, ajustando os ganhos do PID para otimizar a sua capacidade de levar e manter a humidade simulada no setpoint. Os resultados mostram que o sistema responde eficazmente às variações e que o controlador PID, após sintonia, consegue regular a humidade simulada com precisão, baixo overshoot e boa estabilidade, validando a abordagem para cenários onde o controlo físico direto é um desafio.

Keywords: Controlador Digital, Controlador PID, Qualidade de Ar Interior, ESP32, SHT41

1 Introdução

A qualidade do ar interior (IAQ) emergiu como uma preocupação central para a saúde pública, particularmente intensificada pela pandemia de COVID-19, que sublinhou o tempo considerável que os indivíduos passam em ambientes confinados [6]. Nestes espaços, a acumulação de poluentes e contaminantes, muitas vezes indetetáveis pelos sentidos, pode representar riscos significativos para a saúde e bem-estar. Uma IAQ deficiente está associada a diversos problemas, incluindo dores de cabeça, fadiga, redução da capacidade de concentração (devido a CO₂ elevado [1]), problemas respiratórios, reações alérgicas e um decréscimo na produtividade [6].

Entre os vários parâmetros que definem a IAQ, a humidade relativa (HR) desempenha um papel crítico. Manter a HR em níveis moderados (tipicamente 40-60%) é fundamental para minimizar a transmissão viral (e.g., influenza, SARS-CoV-2), otimizar a função imunitária e reduzir riscos associados ao crescimento

de bolor [2]. Níveis de HR fora desta faixa ideal – seja excessivamente alta (promovendo bolor e reações alérgicas) ou baixa (aumentando viabilidade viral e problemas respiratórios) – comprometem o conforto e a saúde dos ocupantes [2]. A ventilação adequada é, portanto, um meio crucial para o controlo da HR.

Contudo, manter condições interiores ótimas é um desafio, dada a natureza dinâmica da IAQ, influenciada pela ocupação, atividades internas, variações climáticas e eficácia dos sistemas de ventilação. Muitos edifícios dependem de ventilação manual (e.g., abrir janelas), uma prática inconsistente [6], e mesmo edifícios com sistemas AVAC podem não ter um controlo de humidade preciso ou otimizado. A tendência para edifícios mais estanques, visando eficiência energética, pode agravar estes problemas ao restringir a ventilação natural [3], tornando essenciais sistemas de controlo automático e inteligente.

Perante estes desafios, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e avaliação de um sistema de controlo digital para a regulação da humidade relativa interior. O sistema utiliza um microcontrolador ESP32 com um sensor de alta precisão SHT41 para aquisição contínua de HR e temperatura. Dada a impraticabilidade de implementar fisicamente um sistema de ventilação forçada controlável no ambiente de teste disponível, um laboratório com volume estimado em 230m^3 , a ação do atuador (um ventilador virtual) é simulada. Um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) discreto, implementado no ESP32, ajusta a taxa de ventilação simulada. Esta saída do PID alimenta um modelo matemático de balanço de massa de humidade, também executado no ESP32, que simula as trocas de ar e o consequente impacto na humidade do ambiente interior simulado. Os dados recolhidos e simulados são transmitidos via MQTT (HiveMQ) para um sistema dedicado (Orange Pi) com uma stack Telegraf, InfluxDB e Grafana para logging, armazenamento e visualização.

A avaliação do sistema de controlo é realizada em duas fases distintas: Análise em Malha Aberta com Estímulo Real: Nesta fase, o controlador PID reage à humidade relativa medida em tempo real no ambiente de teste (`hr_real_sht41`). Embora a ação de controlo simulada não afete o ambiente físico, esta abordagem permite observar e validar a capacidade de resposta do PID a variações e perturbações reais de humidade. Demonstra-se como o controlador identifica o erro e comanda uma ação de controlo simulada apropriada.

Análise em Malha Fechada Simulada Pura: Para avaliar a capacidade do algoritmo PID de efetivamente regular a humidade para um setpoint desejado e para permitir o tuning dos seus ganhos (K_p , K_i , K_d), implementa-se uma simulação em malha fechada. Nesta configuração, o erro do PID é calculado com base na diferença entre o setpoint e a humidade prevista pelo modelo matemático (`hr_modelo_prevista_percent`) do ciclo de controlo anterior. Esta abordagem permite isolar o comportamento do sistema "controlador + modelo da sala" e otimizar a sua performance (tempo de resposta, overshoot, estabilidade).

O objetivo central deste estudo é, portanto, demonstrar a lógica e o desempenho do algoritmo de controlo PID proposto, primeiro na sua reatividade a condições reais (numa configuração de malha aberta para o ambiente físico) e, subsequentemente, na sua eficácia em regular a humidade simulada para um

valor de referência numa simulação em malha fechada. Esta abordagem híbrida oferece uma metodologia de teste e avaliação viável para cenários com restrições na implementação física de atuadores, validando o sistema para potenciais aplicações futuras.

2 Projeto do Sistema e Metodologia

2.1 Ambiente Alvo e Módulo de Sensoriamento

Ambiente Alvo O sistema de controlo digital proposto foi concebido para um ambiente interior real: um laboratório, localizado nas instalações da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). As dimensões do local são aproximadamente 12.75m x 6.5m x 2.8m, resultando num volume total estimado em 230m³. Este ambiente está sujeito a variações naturais de ocupação e condições de ventilação (portas/janelas), permitindo observar a dinâmica da humidade relativa sob influências reais, incluindo a geração interna de humidade por ocupantes.

Módulo de sensoriamento e Aquisição de Dados O componente central para a aquisição de dados e execução do controlo simulado é um microcontrolador ESP32 (modelo ESP32-C6-DevKitC-1). A escolha desta plataforma deve-se à sua adequada capacidade de processamento, à conectividade Wi-Fi integrada – essencial para a comunicação de dados via MQTT – e à sua ampla disponibilidade.

Para a medição contínua da humidade relativa (HR) e da temperatura ambiente, foi selecionado o sensor digital SHT41 da Sensirion. Este sensor é conhecido pela sua alta precisão e estabilidade, oferecendo uma gama de medição de HR de 0 a 100% com uma precisão típica de $\pm 1.8\%$ RH, e uma gama de medição de temperatura de -40 a 125°C com uma precisão típica de $\pm 0.2^\circ\text{C}$. A comunicação entre o SHT41 e o ESP32 é realizada através do protocolo I²C, garantindo uma interface digital robusta. A utilização de um sensor com estas características é fundamental para assegurar a fiabilidade das leituras que servem de base ao algoritmo de controlo.

O firmware do ESP32 foi desenvolvido para realizar leituras do sensor SHT41 a um intervalo de amostragem (T_s) fixo de 60 segundos (1 minuto). Este período de amostragem é considerado adequado para monitorizar as variações de humidade, que tendem a ser graduais em ambientes interiores deste tipo, sem gerar um volume excessivo de dados e sendo compatível com o tempo de resposta do sensor e com as necessidades de processamento do algoritmo de controlo em tempo real.

Os valores de HR e temperatura medidos são processados instantaneamente pelo algoritmo de controlo PID e pelo modelo de simulação do ambiente, ambos implementados no ESP32. Estes dados medidos, juntamente com a ação de controlo simulada e a humidade prevista pelo modelo, são publicados numa topic

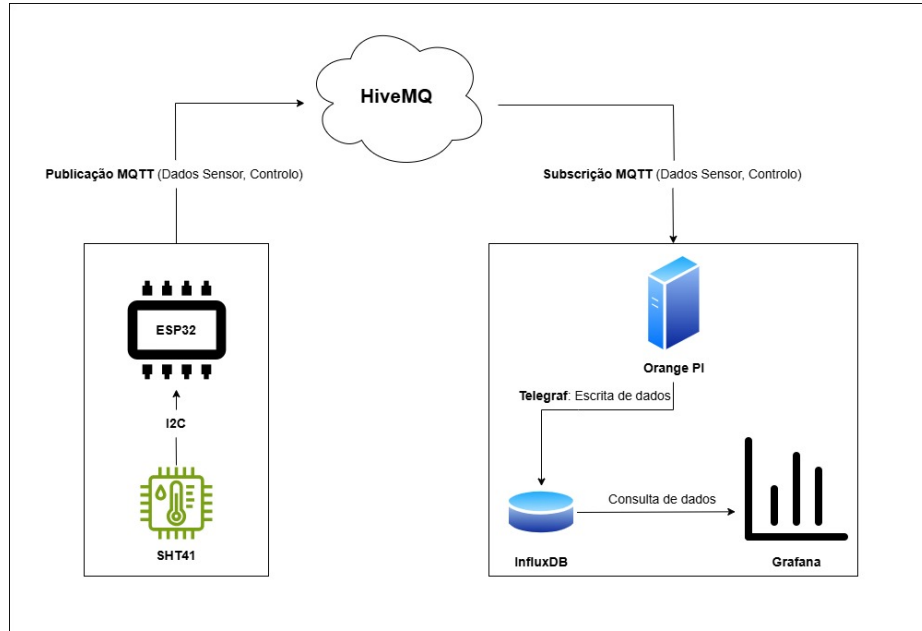


Fig. 1. Diagrama do Fluxo de Dados

MQTT num broker público (HiveMQ). Esta transmissão permite o registo persistente (logging) e a monitorização remota dos dados, que são subsequentemente consumidos por um sistema dedicado (baseado num Orange Pi com Telegraf) para armazenamento numa base de dados de séries temporais (InfluxDB) e visualização através de dashboards (Grafana).

2.2 Ventilação e Modelo de Humidade

A avaliação da resposta do controlador PID proposto, face à impossibilidade de instalar fisicamente um sistema de ventilação controlável no local de estudo, recorreu à simulação matemática. Esta abordagem permite que a ação do atuador (um ventilador virtual) e o seu subsequente impacto na humidade relativa (HR) interior sejam modelados, enquanto o controlador opera com base nas medições reais do sensor SHT41.

Atuador Virtual e Definição da Taxa de Ventilação Simulada A magnitude da ação de controlo, proveniente do algoritmo PID discreto e designada por $u(k)$, é um valor normalizado (tipicamente entre 0 e 100). Este valor representa a intensidade de operação do ventilador virtual e é convertido numa taxa de fluxo de ar de ventilação efetiva, $Q_{\text{vent}}(k)$ (em m^3/s), através de uma relação linear simples,

$$Q_{\text{vent}}(k) = \frac{u(k)}{U_{\text{max}}} \times Q_{\text{max,fan}} \quad (1)$$

Nesta expressão, U_{\max} corresponde ao valor máximo da saída do controlador, neste caso é 100, e $Q_{\max, \text{fan}}$ representa a capacidade volumétrica máxima de fluxo de ar atribuída ao ventilador virtual (m^3/s). O valor de $Q_{\max, \text{fan}}$ é estabelecido considerando o volume da sala (V_{sala}) e uma taxa de renovação do ar (ACH — Air Changes per Hour) alvo, de modo que

$$Q_{\max, \text{fan}} = \frac{\text{ACH}_{\text{alvo}} \times V_{\text{sala}}}{3600}.$$

Modelo Dinâmico da Humidade Interior: Balanço de Massa de Vapor de Água O comportamento dinâmico da humidade no interior do ambiente de teste é modelado através de um balanço de massa de vapor de água. Este princípio fundamental estabelece que a taxa de variação da massa de vapor de água contida no volume da sala é igual à diferença entre a taxa de entrada (por ventilação e geração interna) e a taxa de saída (por ventilação) de vapor de água. Para este modelo, a humidade absoluta (AH), definida como a massa de vapor de água por unidade de massa de ar seco ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$), é a variável chave para descrever a concentração de humidade. Considerando o ar no interior da sala ($V_{\text{sala}} \approx 230 \text{ m}^3$) como perfeitamente misturado e a densidade do ar ($\rho_{\text{ar}} \approx 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ em condições ambiente) como aproximadamente constante, a equação diferencial que descreve a humidade absoluta interior (AH_{int}) é formulada com base em princípios de conservação de massa, consistentes com abordagens encontradas na literatura, como a de Pomianowski et al. (2017) [5]:

$$V_{\text{sala}} \cdot \rho_{\text{ar}} \cdot \frac{d(\text{AH}_{\text{int}})}{dt} = G_{\text{interna}} - (Q_{\text{vent}}(k) \cdot \rho_{\text{ar}}) \cdot (\text{AH}_{\text{int}} - \text{AH}_{\text{ext}}) \quad (2)$$

Nesta equação, V_{sala} representa o volume da sala (m^3), estimado em aproximadamente 230 m^3 para este estudo. O produto $V_{\text{sala}} \cdot \rho_{\text{ar}}$ corresponde à massa de ar (aproximadamente seco) contida na sala (kg). A derivada $\frac{d(\text{AH}_{\text{int}})}{dt}$ denota a taxa de variação temporal da humidade absoluta interior ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ por segundo). G_{interna} é a taxa de geração interna de massa de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{s}$). AH_{int} e AH_{ext} são, respetivamente, as humidades absolutas do ar interior e exterior ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$). As condições do ar exterior, necessárias para calcular AH_{ext} , são fixas ou obtidas através da API da OpenWeatherMap.

O termo de ventilação, $-(Q_{\text{vent}}(k) \cdot \rho_{\text{ar}}) \cdot (\text{AH}_{\text{int}} - \text{AH}_{\text{ext}})$, reflete a remoção líquida (se $\text{AH}_{\text{int}} > \text{AH}_{\text{ext}}$) ou adição líquida (se $\text{AH}_{\text{ext}} > \text{AH}_{\text{int}}$) de humidade devido à troca de ar com o exterior.

Para integração no sistema de controlo digital, a Equação 2 é discretizada no tempo. Utilizando o método de Euler progressivo, com um passo de integração igual ao período de amostragem T_s (60 segundos), obtém-se

$$\text{AH}_{\text{int_modelo}}(k+1) = \text{AH}_{\text{int_modelo}}(k) + \frac{T_s}{V_{\text{sala}} \cdot \rho_{\text{ar}}} \cdot [G_{\text{interna}} - (Q_{\text{vent}}(k) \cdot \rho_{\text{ar}}) \cdot (\text{AH}_{\text{int_modelo}}(k) - \text{AH}_{\text{ext}}(k))] \quad (3)$$

Nesta forma discretizada, $\text{AH}_{\text{int_modelo}}(k+1)$ é a humidade absoluta interior prevista pelo modelo para o instante $k+1$. Esta previsão baseia-se no estado anterior do modelo, $\text{AH}_{\text{int_modelo}}(k)$, na ação de controlo de ventilação

$Q_vent(k)$ (que é determinada pelo PID com base na HR_int_medida real do sensor SHT41), e nas condições exteriores $AH_ext(k)$. O estado inicial do modelo, $AH_int_modelo(0)$, é determinado a partir da primeira medição de HR e temperatura do sensor, convertida para humidade absoluta.

Relações Psicrométricas: Conversão entre Humidade Relativa e Absoluta O sensor SHT41, utilizado neste estudo, fornece medições de humidade relativa (HR) e temperatura (T). Adicionalmente, o setpoint do controlador PID é definido em termos de HR. Contudo, o modelo dinâmico de balanço de massa de vapor de água (Equação 3) opera com humidade absoluta. Desta forma, a interconversão precisa entre estas grandezas psicrométricas é essencial e é realizada com base nas formulações e princípios estabelecidos no ASHRAE Fundamentals Handbook (2001, Cap. 6).

Cálculo da Pressão de Vapor de Saturação (P_{sat}): A pressão de vapor de saturação da água (P_{sat} , em Pa) à temperatura medida T é um parâmetro chave. É calculada utilizando a formulação de Hyland e Wexler, recomendada pela ASHRAE [1]:

$$\ln(P_{sat}) = \frac{C_8}{T_k} + C_9 + C_{10}T_k + C_{11}T_k^2 + C_{12}T_k^3 + C_{13}\ln(T_k) \quad (4)$$

Nesta equação, T_k é a temperatura absoluta em Kelvin ($T_k = T_{celsius} + 273.15$), e C_8 a C_{13} são constantes específicas para a saturação sobre água líquida, cujos valores são: $C_8 = -5.8002206 \times 10^3$, $C_9 = 1.3914993$, $C_{10} = -4.8640239 \times 10^{-2}$, $C_{11} = 4.1764768 \times 10^{-5}$, $C_{12} = -1.4452093 \times 10^{-8}$, $C_{13} = 6.5459673$.

Estes coeficientes são válidos para a gama de temperatura de 0 a 200°C.

Cálculo da Pressão Parcial de Vapor de Água (P_v): A partir da humidade relativa medida (HR, em %) e da $P_{sat}(T)$ calculada, a pressão parcial de vapor de água (P_v , em Pa) no ar é determinada conforme [1, p. 6.9, Eq. 24]:

$$P_v = \left(\frac{HR}{100} \right) \cdot P_{sat}(T) \quad (5)$$

Cálculo da Humidade Absoluta (AH): A humidade absoluta (AH, em kg_vapor/kg_ar_seco), correspondente à razão de humidade W na nomenclatura ASHRAE, é então calculada utilizando P_v e a pressão atmosférica total (P_{atm} , assumida como 101325 Pa) [1, p. 6.8, Eq. 22]:

$$AH = 0.62198 \times \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (6)$$

O fator 0.62198 representa o rácio entre a massa molar da água (18.01528 g/mol) e a massa molar do ar seco (28.9645 g/mol) [1].

De forma análoga, após o modelo de simulação (Equação 3) calcular a humidade absoluta interior prevista, $AH_int_modelo(k+1)$, a correspondente humidade relativa simulada, $HR_int_modelo(k+1)$, é obtida. Este cálculo utiliza a

temperatura interior medida no instante k , $T_{\text{int}}(k)$, assumindo que o impacto da ventilação simulada na temperatura é negligenciável para um único passo de tempo no âmbito deste modelo simplificado.

Cálculo da Pressão Parcial de Vapor de Água Simulada (P_{v_modelo}): A partir de $AH_{\text{int_modelo}}(k+1)$, e invertendo a lógica da Equação 6, a pressão parcial de vapor de água que corresponderia a esta humidade absoluta é [derivado de]:

$$P_{v_modelo}(k+1) = \frac{AH_{\text{int_modelo}}(k+1) \cdot P_{\text{atm}}}{0.62198 + AH_{\text{int_modelo}}(k+1)} \quad (7)$$

)

Cálculo da Humidade Relativa Simulada ($HR_{\text{int_modelo}}$): Finalmente, a humidade relativa simulada ($HR_{\text{int_modelo}}$, em %) é calculada utilizando $P_{v_modelo}(k+1)$ e a pressão de vapor de saturação à temperatura $T_{\text{int}}(k)$ [derivado de 1]:

$$HR_{\text{int_modelo}}(k+1) = \frac{P_{v_modelo}(k+1)}{P_{\text{sat}}(T_{\text{int}}(k))} \times 100 \quad (8)$$

$HR_{\text{int_modelo}}(k+1)$ é a previsão do modelo sobre o estado da humidade interior resultante da ação de controlo simulada. O algoritmo PID, para o cálculo do erro no ciclo $k+1$, utilizará sempre a $HR_{\text{int_medida}}(k+1)$ real, obtida diretamente do sensor SHT41, assegurando que o controlo reage às condições efetivas do ambiente.

Malha aberta vs Malha fechada A avaliação da resposta do controlador PID proposto e do modelo de humidade foi conduzida em duas fases distintas para analisar diferentes aspetos do sistema. Na primeira fase, designada "Análise em Malha Aberta com Estímulo Real", o controlador PID opera com base nas medições de humidade relativa ($HR_{\text{int_medida}}$) obtidas em tempo real de um ambiente residencial. A ação de controlo simulada ($Q_{\text{vent}}(k)$) resultante alimenta o modelo dinâmico (Equação 3), gerando uma previsão da humidade interior ($HR_{\text{int_modelo}}(k+1)$). Esta abordagem permite observar a reatividade do PID a condições ambientais reais e perturbações, e o comportamento do modelo preditivo em resposta à ação de controlo simulada, embora a malha de controlo não seja fisicamente fechada sobre o ambiente real.

Dada a impossibilidade de o atuador simulado influenciar a $HR_{\text{int_medida}}$ real, e para permitir uma avaliação rigorosa da capacidade do algoritmo PID de regular a variável de processo para um setpoint desejado e para facilitar a sintonia dos seus ganhos, uma segunda fase de testes foi implementada: "Análise em Malha Fechada Simulada Pura". Nesta configuração, o modelo dinâmico da humidade interior (Equação 3) é usado para gerar a variável de processo que realimenta o controlador PID. Assim, a $HR_{\text{int_modelo}}(k)$ (a humidade simulada no instante anterior) é utilizada para o cálculo do erro do PID no instante k , permitindo que o controlador atue diretamente sobre a evolução da humidade simulada. Esta abordagem isola o sistema 'controlador + modelo da sala', possibilitando um tuning eficaz e a análise da performance do controlo em atingir e manter o setpoint.

2.3 Controlador PID Discreto

Para a regulação da humidade relativa (HR) interior, visando a manutenção desta variável em torno de um valor de referência especificado (HR_setpoint), optou-se pela implementação de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Conforme discutido por Ogata [4], os controladores PID são amplamente utilizados em sistemas de controlo industrial devido à sua capacidade de combinar as vantagens das ações de controlo proporcional, integral e derivativa, resultando num desempenho robusto e eficaz para uma vasta gama de processos.

Definição do Erro de Controlo O princípio de funcionamento do controlador PID baseia-se no erro, $e(t)$, que é a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor medido da variável controlada. No contexto discreto deste trabalho, em cada instante de amostragem k , o erro é calculado como

$$e(k) = HR_setpoint - HR_int_medida(k) \quad (9)$$

Onde $HR_int_medida(k)$ é a humidade relativa interior lida pelo sensor SHT41 no instante k .

Esta definição de erro (Equação 9) foi utilizada na fase de "Análise em Malha Aberta com Estímulo Real". Para a fase de "Análise em Malha Fechada Simulada Pura", o erro do controlador PID foi calculado com base na humidade relativa prevista pelo modelo no instante de amostragem anterior, $HR_int_modelo(k-1)$, conforme

$$e(k) = HR_setpoint - HR_int_modelo(k-1) \quad (10)$$

Esta alteração é fundamental para permitir que o controlador PID atue diretamente sobre a variável de saída do modelo, possibilitando a avaliação do seu desempenho em regime de malha fechada.

Algoritmo do Controlador PID Discreto A ação de controlo $u(t)$ de um controlador PID ideal em tempo contínuo é classicamente definida como:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Onde K_p é o ganho proporcional, K_i o ganho integral ($K_i = K_p/T_i$), e K_d o ganho derivativo ($K_d = K_p \cdot T_d$), sendo T_i o tempo integral e T_d o tempo derivativo [4].

Para a implementação digital, discretizamos esta equação. Existem várias formas de discretizar um controlador PID. Neste trabalho, foi adotada uma forma incremental (ou de velocidade) para o algoritmo PID. Esta abordagem calcula a variação da ação de controlo $\Delta u(k)$ a cada passo e é vantajosa para mitigar o fenómeno de "integral windup" e para implementações onde a ação de controlo é aplicada de forma incremental. Uma forma comum de PID discreto incremental é:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i T_s e(k) + \frac{K_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (12)$$

A ação de controlo total $u(k)$ (normalizada, representando a intensidade do ventilador virtual) a ser aplicada no instante k é então obtida por:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (13)$$

K_p , K_i , K_d representam os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador discreto. T_s é o período de amostragem. $e(k)$, $e(k-1)$, $e(k-2)$ são os erros de controlo no instante atual k , no instante $k-1$, e no instante $k-2$, respetivamente. $u(k-1)$ é a ação de controlo aplicada no instante anterior.

Componentes da Ação de Controlo PID A eficácia do controlador PID advém da combinação das suas três componentes, conforme descrito por Ogata [4]:

Ação Proporcional (P): O termo proporcional (relacionado com K_p) fornece uma correção que é diretamente proporcional ao erro atual. Aumentar K_p geralmente acelera a resposta do sistema, mas pode levar a um aumento do overshoot e, em excesso, à instabilidade.

Ação Integral (I): O termo integral (relacionado com K_i ou T_i) acumula os erros passados. A sua principal contribuição é a eliminação do erro em regime estacionário. No entanto, pode introduzir lentidão na resposta e agravar o overshoot se não for bem sintonizado.

Ação Derivativa (D): O termo derivativo (relacionado com K_d ou T_d) responde à taxa de variação do erro, providenciando uma ação antecipativa. Esta componente tende a melhorar a estabilidade do sistema, reduzir o overshoot e diminuir o tempo de estabelecimento. Em contra partida, pode amplificar ruídos de alta frequência presentes no sinal de erro.

Limitação da Ação de Controlo (Saturação) A saída calculada do controlador PID, $u(k)$, que no presente trabalho corresponde à intensidade de operação do ventilador virtual, deve ser restringida a uma gama operacional funcional. Assim, a ação de controlo é limitada para permanecer no intervalo $[U_{\min}, U_{\max}]$:

$$\text{se } u(k) < U_{\min}, \text{ então } u(k) = U_{\min} \quad \text{e} \quad \text{se } u(k) > U_{\max}, \text{ então } u(k) = U_{\max}$$

Tipicamente, $U_{\min} = 0\%$ (ventilador desligado) e $U_{\max} = 100\%$ (capacidade máxima).

Estratégia de Sintonia dos Parâmetros PID Para este trabalho, a sintonia dos parâmetros PID foi realizada primariamente durante a fase de *Análise em Malha Fechada Simulada Pura*. Utilizou-se um método heurístico de tentativa e erro, ajustando iterativamente os ganhos K_p , K_i e K_d e observando a resposta da `HR_int_modelo(k)` (humidade simulada) através dos dashboards no Grafana.

O período de amostragem T_s do controlador foi definido em 5 segundos, após testes iniciais indicarem que este valor proporcionava um bom compromisso entre a velocidade da simulação para análise e a representação da dinâmica do sistema. Foram configuradas condições de temperatura do modelo e de ar exterior fixas para isolar o comportamento do PID e do modelo de influências externas variáveis durante o processo de sintonia.

3 Resultados Experimentais e Discussão

3.1 Fase 1: Análise em Malha Aberta com Estímulo Real

Nesta fase inicial, avaliou-se a capacidade do controlador PID implementado no ESP32 em responder a variações reais da humidade relativa (**hr_real_sht41**), medida num ambiente residencial típico. O erro do PID foi calculado como **erro_pid** = **HR_setpoint** - **hr_real_sht41**, com **HR_setpoint** fixado em 55%. A ação de controlo simulada (**output_pid_percent**) resultante e a humidade prevista pelo modelo (**hr_modelo_prevista_percent**) foram observadas para analisar a reatividade e a lógica do controlo, bem como o comportamento do modelo preditivo. As perturbações na **hr_real_sht41** foram induzidas através de diferentes interações do operador com o sensor e com o ambiente, como aproximação ao sensor SHT41, e alteração das condições de ventilação natural do local (abertura de janelas e portas).



Fig. 2. Resposta do Sistema em Malha Aberta

Inicialmente, em condições ambientais relativamente estáveis (antes das 15:45), a **hr_real_sht41** (linha azul no painel superior, linha verde escura no painel inferior) flutuou naturalmente, permanecendo consistentemente abaixo do setpoint de 55%. Consequentemente, o **erro_pid** (linha azul no painel inferior, eixo Y direito) manteve-se positivo. Nestas circunstâncias, o **output_pid_percent** (linha

verde no painel superior, eixo Y direito) permaneceu predominantemente em 0% ou exibiu apenas picos de atividade mínima e esporádica. Este comportamento é congruente com uma lógica de controlo orientada para a desumidificação, onde não é necessária ação corretiva significativa se a humidade já se encontra abaixo do valor desejado. A `hr_modelo_prevista_percent` (linha amarela no painel superior) acompanhou a tendência da `hr_real_sht41`, refletindo a ausência de uma forte ação de controlo simulada.

A introdução de perturbações permitiu observar a reatividade do PID. Por volta das 15:45, a aproximação gradual do operador ao sensor causou uma subida na `hr_real_sht41`, que eventualmente ultrapassou o setpoint de 55%, atingindo um pico próximo de 58%. Em resposta, o `erro_pid` tornou-se negativo, e o `output_pid_percent` aumentou de forma significativa (com picos atingindo valores entre 40–60% e um máximo próximo de 80%), simulando uma forte ação de desumidificação. Durante este período de `output_pid_percent` elevado, a `hr_modelo_prevista_percent` mostrou uma tendência de descida, indicando que o modelo matemático estava a responder à ação de controlo simulada.

Posteriormente, com o operador a afastar-se do sensor e o quarto a ser deixado com a porta fechada, a `hr_real_sht41` estabilizou. A abertura de janelas e portas por volta das 16:26 introduziu novas flutuações na `hr_real_sht41`. Um evento mais pronunciado ocorreu a partir das 17:25, com a chegada do operador ao quarto e a ligação de um PC, o que levou a uma subida mais sustentada da `hr_real_sht41` novamente acima do setpoint. O `output_pid_percent` respondeu com atividade aumentada e picos mais elevados, demonstrando a tentativa simulada do controlador de contrariar este aumento de humidade.

Finalmente, a partir das 18:00, foram induzidas perturbações rápidas e repetidas. Cada um destes picos na `hr_real_sht41` que excedia o setpoint resultou numa resposta imediata e proporcional do `output_pid_percent`, validando a rápida reatividade do PID a variações de curta duração. Durante todos estes eventos, a `hr_modelo_prevista_percent` refletiu a influência da ação de controlo simulada.

Em conclusão, os resultados desta fase demonstram que o controlador PID é capaz de detetar o erro em relação ao setpoint com base em medições reais de humidade e de comandar uma ação de controlo simulada apropriada e proporcional, particularmente quando a humidade excede o valor de referência. O modelo matemático da humidade interna também responde de forma coerente a esta ação de controlo simulada. Esta análise em malha aberta real valida a lógica fundamental do controlador e do modelo, preparando o sistema para a fase subsequente de sintonia em simulação de malha fechada pura.

3.2 Fase 2: Análise em Malha Fechada Simulada e Sintonia do PID

Para avaliar a capacidade intrínseca do algoritmo PID em regular a humidade para o valor de referência desejado e para otimizar os seus ganhos (K_p , K_i , K_d), foi implementada uma simulação em malha fechada. Nesta configuração, conforme descrito na Equação (10), o erro do PID (`erro_pid`) é calculado com base na diferença entre o `HR_setpoint` e a humidade relativa prevista pelo modelo

matemático no instante de amostragem anterior ($hr_modelo_prevista_percent(k-1)$). Esta abordagem permite isolar o comportamento do sistema “controlador + modelo da sala”, possibilitando um tuning eficaz dos ganhos PID e uma análise detalhada da performance do controle.

A estratégia de sintonia dos parâmetros PID adotada foi um método heurístico de tentativa e erro, ajustando iterativamente os ganhos K_p , K_i e K_d . A resposta da $hr_modelo_prevista_percent$ foi observada através dos dashboards desenvolvidos no Grafana, com um período de amostragem do controlador (T_s) fixado em 5 segundos, após testes iniciais indicarem um bom compromisso entre velocidade de simulação e representação da dinâmica. Para isolar o comportamento do PID e do modelo de influências externas variáveis, foram configuradas condições de temperatura do modelo ($temp_modelo = 22.0^\circ C$) e de ar exterior ($hr_externa_fixa = 70.0\%$, $temp_externa_fixa = 20.0^\circ C$) como fixas. A humidade inicial simulada ($hr_inicial_simulada$) foi definida como 45.0% e o $HR_setpoint$ como 50.0% . Adicionalmente, foi introduzida uma pequena taxa de remoção de humidade constante no modelo ($G_int_mass_modelo = -0.000010\text{ kg/s}$) para simular perdas naturais e testar a capacidade do PID de manter o setpoint sob uma perturbação contínua.



Fig. 3. Resposta do Sistema em Malha Fechada

Esta configuração foi o resultado da combinação dos ganhos ($K_p=6$, $K_i=4.5$, $K_d=0.2$) com o G_int negativo, resultando na performance desejada. Observa-se que, face ao erro inicial positivo de $+5\%$ a ação de controlo ($output_pid_percent$) responde rapidamente, atingindo a saturação de 100% (levando $q_vent_sim_m3s$ ao máximo) quase instantaneamente. Esta ação máxima é mantida por aproximadamente 11-12 minutos, durante os quais a $hr_modelo_prevista_percent$ exibe uma subida rápida em direção ao setpoint.

A variável controlada ($hr_modelo_prevista_percent$) atinge o valor de referência de 50.0% em cerca de 12 minutos após o início da simulação. Notavelmente,

o overshoot percentual é mínimo, com a humidade simulada a atingir um pico de 50.4%, representando um desvio de apenas 0.8% acima do setpoint.

Após o breve overshoot, a $hr_modelo_prevista_percent$ estabiliza com notável precisão e o $erro_pid$ correspondente é efetivamente eliminado, permanecendo muito próximo de zero em regime estacionário. Um aspeto crucial do desempenho observado é o comportamento da $output_pid_percent$. Em vez de retornar a zero, a saída do controlador estabiliza num valor positivo pequeno (flutuando entre aproximadamente 1.5% e 3.5%). Este esforço de controlo contínuo demonstra a capacidade do controlador de compensar a remoção constante de humidade simulada pela $G_int_mass_modelo$ negativa, mantendo assim a humidade no valor desejado. Em conclusão, a configuração de ganhos PID $K_p=6.0$, $K_i=4.5$ e $K_d=0.2$ provou ser altamente eficaz para o sistema simulado, proporcionando um excelente equilíbrio entre rapidez de resposta, minimização do overshoot, eliminação de erro em estado estacionário e capacidade de rejeição a perturbações constantes.



Fig. 4. Resposta do mesmo PID a Diferente Humidade Externa

A Figura demonstra a resposta do mesmo controlador PID quando a condição de humidade relativa do ar exterior simulado foi ajustada para 60% (mantendo a temperatura exterior em 20°C e $G_int_mass_modelo$ em -0.000010 kg/s), partindo de uma humidade interna simulada inicial de 45% e um setpoint de 50%. O tempo para atingir o setpoint de 50% foi de aproximadamente 35 minutos, um aumento em relação a cenários com ar exterior mais húmido, refletindo a maior “dificuldade” para a humidificação. O overshoot foi extremamente bem controlado, com a humidade simulada atingindo um pico de apenas 50.2% (um overshoot de 0.4% relativo). Subsequentemente, o sistema estabilizou no setpoint, com o $erro_pid$ a convergir para zero. Este teste evidencia a robustez do conjunto de ganhos PID sintonizado, que, embora apresente uma resposta mais lenta devido à alteração nas condições de entrada (menor humidade do

ar exterior), ainda assim consegue atingir o setpoint com excelente precisão e overshoot mínimo, adaptando o seu esforço de controlo em estado estacionário para compensar perturbações.

4 Conclusão

A abordagem híbrida utilizada, que combinou dados de um sensor físico com um atuador simulado, provou ser uma metodologia eficaz para o desenvolvimento e validação de sistemas de controlo de humidade. A avaliação em duas fases revelou-se crucial para validar a lógica e a performance do sistema na ausência de um atuador físico.

A capacidade do controlador PID para reagir de forma rápida e proporcional a perturbações ambientais foi confirmada através da análise em malha aberta, houve uma ação de controlo coerente com os estímulos de humidade reais. Subsequentemente, a simulação em malha fechada pura permitiu a sintonia fina dos ganhos do PID (K_p , K_i , K_d) e demonstrou a eficácia do sistema em atingir e manter o setpoint com notável precisão, estabilidade e overshoot mínimo, mesmo na presença de perturbações contínuas. A capacidade do controlador para manter uma saída de controlo estável e não nula em regime estacionário para compensar perdas de humidade simuladas evidencia a sua robustez.

No entanto, as pequenas oscilações observadas neste esforço de controlo, embora eficazes na simulação, são indesejáveis numa aplicação prática. Para mitigar o desgaste de atuadores físicos e otimizar a eficiência energética, a saída do PID (`output_pid_percent`) deve ser processada por um filtro passa-baixo ou igualar o valor médio das oscilações, de modo a suavizar a ação de controlo.

Este estudo demonstra a viabilidade de um sistema de controlo de baixo custo e estabelece uma base sólida para futuras implementações físicas. Os próximos passos incluem a transição do modelo para um sistema com atuadores reais, a exploração de métodos de auto-tuning para os parâmetros PID, e a expansão do sistema para um controlo multi-variável que integre outros indicadores de IAQ, como os níveis de CO_2 .

References

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): Chapter 6: Psychrometrics. In: ASHRAE Fundamentals Handbook (SI Units), pp. 6.1–6.17. ASHRAE, Atlanta, GA (2001)
2. Jones, E.R., Cedeño Laurent, J.G., Young, A.S., Coull, B.A., Spengler, J.D., Allen, J.G.: Indoor humidity levels and associations with reported symptoms in office buildings. *Indoor air* **32**(1), e12961 (2022)
3. Küçükhüseyin, : CO monitoring and indoor air quality. *REHVA Journal* pp. 54–59 (Feb 2021)
4. Ogata, K.: Engenharia de Controle Moderno. Pearson Education do Brasil, 5 edn. (2011)

5. Pomianowski, M., Heisleberg, P., Drivsholm, C.: New calculation method to solve moisture balance in the room with regenerator heat recovery and infiltration. *Energy Procedia* **132**, 135–140 (2017)
6. Settimo, G., Indinnimeo, L., Inglessis, M., De Felice, M., Morlino, R., di Coste, A., Carriera, F., Di Fiore, C., Avino, P.: Co2 levels in classrooms: What actions to take to improve the quality of environments and spaces. *Sustainability* **16**(19), 8619 (2024)