

Título: Supervisório Para Monitoramento De Processos De Desumidificação Por Adsorção Com Controle Por Estados Finitos

Caio Marcilio dos Santos
IFSP, Salto, SP, Brasil

João Victor Gomes de Matos
IFSP, Salto, SP, Brasil

Matheus Yuji Otaguro Neves
IFSP, Salto, SP, Brasil

José William Rodrigues Pereira
IFSP, Salto, SP, Brasil

Mauro Sérgio Braga
IFSP, Salto, SP, Brasil

D.O.I:

Resumo: A secagem de ar comprimido por adsorção é um processo amplamente empregado em sistemas industriais e o estudo de métodos de medição e controle mais precisos e eficientes é fundamental para o avanço tecnológico desse tipo de aplicação. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo para simulação de um sistema de secagem por adsorção baseado na medição de massa com um controle por máquina de estados finitos, visando avaliar a viabilidade dessas tecnologias em um sistema de baixo custo. O protótipo foi implementado em uma plataforma embarcada ESP32, com instrumentação de medição mássica desenvolvida em conjunto, controle de válvulas e solenoides, comunicação via MQTT, interface de monitoramento local em Python e armazenamento das medições em banco de dados. Os testes demonstraram estabilidade e repetibilidade nas medições de massa, com erros inferiores a 0,05 kg, confirmando a confiabilidade da instrumentação desenvolvida e a validação da eficiência do controle por estados finitos pelas rápidas e consistentes transições entre estados. Os resultados indicam que a instrumentação é funcional em diferentes situações de medição de massa e que o método de controle proposto é viável para sistemas de secagem industriais, conciliando versatilidade, eficiência e baixo custo.

Palavras-chave: Secagem por adsorção. Medição de massa. Máquina de estados finitos. Comunicação MQTT.

Abstract: Compressed air drying by adsorption is a process widely used in industrial systems, and the study of more accurate and efficient measurement and control methods is essential for the technological advancement of this type of application. This work presents the development of a prototype for simulating an adsorption drying system based on mass measurement with a finite state machine control, aiming to evaluate the feasibility of these technologies in a low-cost system. The prototype was implemented on an ESP32 embedded platform, featuring an in-house developed mass measurement instrumentation, valve and solenoid control, MQTT communication, a local monitoring interface built in Python, and data storage in a database. The tests demonstrated stability and repeatability in mass measurements, with errors below 0.05 kg, confirming the reliability of the developed instrumentation and validating the efficiency of the finite state control through fast and consistent state transitions. The results indicate that the developed instrumentation is functional in different mass measurement scenarios and that the proposed control method is viable for industrial drying systems, combining versatility, efficiency, and low cost.

Keywords: *Adsorption drying. Mass measurement. Finite state machine. Embedded system. MQTT communication.*

INTRODUÇÃO

No meio industrial, o uso de ar comprimido é fundamental para a realização, manutenção e condicionamento de processos produtivos de diversos setores. A produção de ar seco é essencial para garantir a longevidade e operabilidade dos sistemas, visto que a umidade presente no ar é danosa para tubulações, máquinas e ambientes controlados refletindo uma necessidade geral de secagem de ar (Compressed Air & Gas Institute, 2023). O principal método aplicado para a realização deste procedimento é a adsorção, por sua praticidade na aplicação e simplicidade do sistema. Ainda que amplamente aplicada, os sistemas de secagem de ar comprimido baseados em adsorção não são estudados com a mesma intensidade, pois seu método de controle temporizado foi aceito como suficiente na maioria dos casos. A partir disso, há margem para melhoria do processo e análise de metodologias de controle para tornar o sistema mais eficiente e também aplicar arquiteturas de baixo custo.

Em aplicações de secagem as moléculas de vapor de água são retidas por materiais dessecantes porosos, como sílica gel, alumina ativada, zeólitas moleculares e outros adsorventes especializados. Como mostrado em Ruthven (1984) e Alsharif (2024) as aplicações que dependem deste processo, denominado como fisissorção, se beneficiam da capacidade dos adsorventes de reter moléculas através de interações fracas e reversíveis, o que torna sua utilização viável em diversos tipos de processos. No geral, a aplicação deste tipo de secagem é dada pela sua versatilidade e eficácia em resolver uma vasta gama de desafios como a purificação de ar, tratamento de água, separação de gases, secagem de alimentos, controle de umidade em hospitais e indústrias farmacêuticas e secagem de ar comprimido para aplicações industriais.

A arquitetura de sistemas de secagem é comumente constituída por dois recipientes pressurizados que se revezam na atuação do processo. O primeiro recipiente entra em operação e realiza a secagem do ar durante a passagem deste pelo material adsorvente e segue em atuação até a saturação do material. Neste momento, ele perde sua característica adsortiva e precisa ser regenerado ao estado inicial para reconstituir sua característica. Este processo pode ser realizado por meio de passagem de ar forçado ou aquecimento, como mostram Ruthven (1984), Pierri (1998) e Alsharif (2024), fazendo com que a umidade retida na superfície do adsorvente seja dissipada e eliminada com o fluxo de ar forçado direcionado a uma válvula de saída para o meio externo, denominada purga. Após isso, o recipiente é pressurizado novamente e, durante todo este processo, o segundo recipiente é acionado para manter o fluxo contínuo de ar comprimido condicionado.

Os fornecedores de equipamentos para esta aplicação normalmente utilizam o controle temporizado como principal método de controle de acionamento entre os vasos de pressão. De acordo com Air Filter Europe (2018) e Omega Air (2025), para o controle temporizado é adotado como padrão um tempo de 10 minutos para cada ciclo de operação, onde o processo de secagem ocorre por 5 minutos em cada vaso de pressão, seguido de 4 minutos de regeneração do elemento adsorvente e 1 minuto de pressurização. Como alternativa a esse tipo de controle, é utilizado o controle pelo ponto de orvalho do ar comprimido, não sendo mais um controle com tempo fixo, mas

sim um que varia conforme a umidade presente no ar na saída do sistema de secagem.

A arquitetura atual de sistemas de secagem industrial mostra a estagnação de metodologias de controle, evidenciando a lacuna para aprimorar a atuação do sistema controlador e tornar a operação mais eficiente. O controle temporizado, por não ser orientado ao estado real do adsorvente, limita sua operação à estimativa prévia do estado da sílica gel dentro do vaso de pressão. Em contrapartida, metodologias de controle modernas, como a estruturação baseada em máquina de estados finitos, trazem maior definição dos processos que ocorrem entre as alterações entre vasos de pressão e permitem maior gerenciamento do processo quando implementados com a instrumentação necessária para o monitoramento.

Em conjunto com as caracterizações dos processos de adsorção e regeneração, faz-se necessário o estudo de aplicação de instrumentação específica para monitorar o sistema durante o seu funcionamento e a revisão de custo para isso. Conforme mostrado por Vieira *et al.*, (2025), ainda são necessários estudos para desenvolver métodos de medição mássica para evidenciar a redução do peso da sílica durante a regeneração do material e, também, para evidenciar a saturação. Ainda neste sentido, a aplicação para secagem de aerossóis desenvolvida por Kecorius *et al.* (2024) evidencia a clara possibilidade de reduzir o custo total de sistemas de secagem baseados em adsorção utilizando métodos de produção de materiais baseados em impressão 3D e materiais de laboratório como o procedimento de corte à laser e instrumentação de baixo custo.

Com o objetivo de verificar a viabilidade de utilizar novos métodos de controle para sistemas de secagem baseados em adsorção para desumidificação de ar comprimido em meio industrial, este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de um sistema supervisor para simulação de controle e monitoramento do processo de secagem. O controle baseado em máquina de estados finitos busca demonstrar a possibilidade de melhoria no gerenciamento do processo e o desenvolvimento da instrumentação busca o acompanhamento das condições por meio da medição mássica baseada em células de carga com uma arquitetura de baixo custo. Através do desenvolvimento da eletroeletrônica e interface de monitoramento necessários para a simulação do sistema, busca-se evidenciar a possibilidade de

adaptação dos sistemas utilizados atualmente para redução do custo da arquitetura de secagem, implementação de métodos mais avançados de controle e possibilidade de monitoramento do adsorvente por medição gravimétrica. A estrutura desenvolvida será validada por meio de aquisição e processamento dos dados e análise da performance do protótipo com testes de funcionamento de todos os subsistemas aplicados no projeto. O monitoramento dos dados será realizado por uma interface local desenvolvida com Python e frameworks dedicados, com aquisição de dados baseada em comunicação MQTT. Espera-se que o protótipo desenvolvido contribua para a análise da redução de custos, melhoria na metodologia de controle e estudo da possibilidade de revisão da arquitetura de sistemas de secagem empregada atualmente.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema supervisorio para simulação de secagem por adsorção para ar comprimido foi desenvolvido com base na arquitetura apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama ilustrando a montagem do sistema

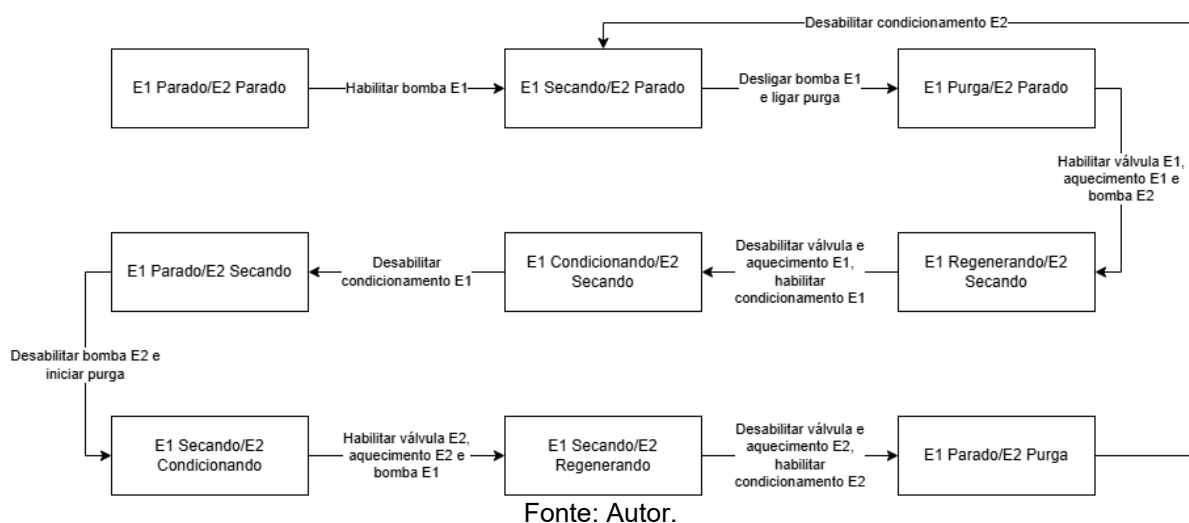


Fonte: Autor.

A infraestrutura completa consiste no desenvolvimento da instrumentação necessária para aquisição das medições mássicas com base em células de carga, implementação e montagem do circuito eletroeletrônico para alimentação adequada do sistema e acoplamento do circuito de atuação para acionamento das válvulas e bombas da simulação, proteção da eletrônica com um invólucro para a placa de montagem, programação do microcontrolador para realizar os comandos e manter a comunicação, disponibilização da infraestrutura de comunicação MQTT no servidor, instanciamento do banco de dados local e desenvolvimento da interface de monitoramento.

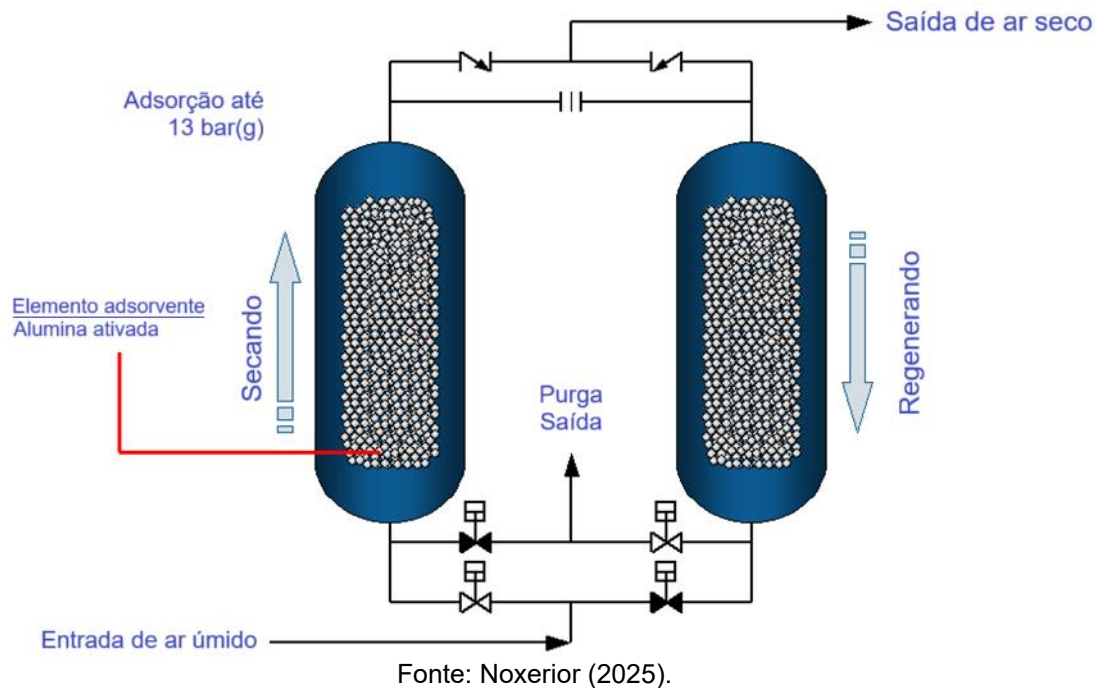
O funcionamento do protótipo foi desenvolvido com base na estrutura mais comum de secadores de ar utilizada na indústria. São comumente aplicados dois secadores iguais com funcionamento alternado, realizando processos inversos durante a operação. Enquanto um recipiente está realizando a secagem do ar comprimido, o outro estará em processo de regeneração, condicionamento ou em espera para atuação, caso tenha realizado os outros processos. O único processo que é realizado simultaneamente pelos dois secadores de ar é a purga, por necessitar realizar o retorno de ar para o meio externo.

Figura 2 – Fluxograma de funcionamento do sistema



A Figura 2 demonstra um fluxograma do processo de funcionamento do sistema, destacando o que deve ser acionado em cada transição entre os estados, e a Figura 3 apresenta a estrutura de funcionamento de um sistema de secagem de ar comprimido industrial. A proposta do desenvolvimento é simular o ciclo de funcionamento de um secador real. Como não seria possível replicar um sistema completo de secagem para realizar a validação da lógica de funcionamento e testar o monitoramento gravimétrico das medições de massa do sistema, foram utilizados relés para simulação das válvulas da tubulação de ar comprimido, solenoides para a saída de ar seco e bombas de água para a entrada de ar úmido.

Figura 3 – Exemplo de sistema de secagem de ar comprimido



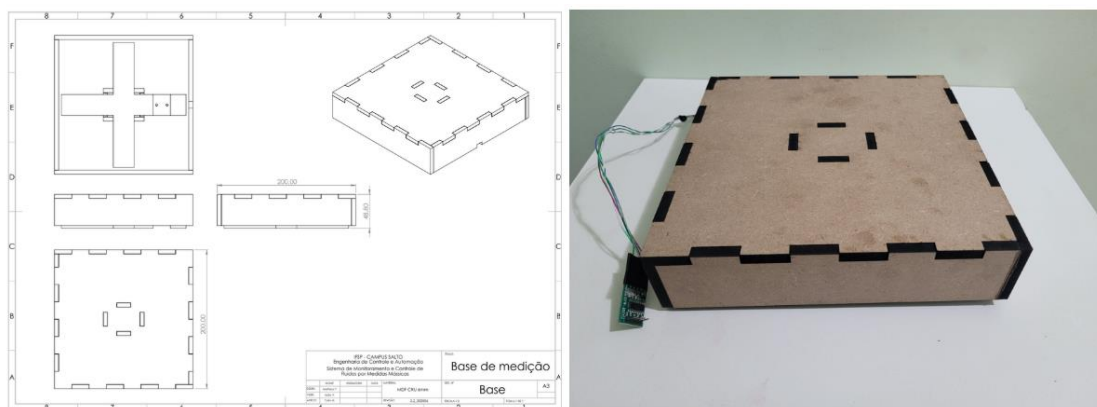
Na Figura 3, a pressão de 13 bar indica a pressão máxima do ar comprimido com a qual a adsorção consegue operar no sistema apresentado. Neste exemplo de sistema de secagem, o adsorvente é a alumina, um óxido de alumínio, que funciona da mesma forma que a sílica gel. A não linearidade do comportamento dos adsorventes dada pela hidrodinâmica do processo de adsorção é abstraída ao substituí-los por um recipiente com vazão de água, mantendo o objetivo principal de validar o funcionamento do sistema eletrônico e o software.

ESTRUTURA MECÂNICA

A instrumentação de medição de massa foi baseada em células de carga de ponto único, também nomeadas como células de carga de viga de flexão, pela simplicidade de instalação. Elas funcionam como engastadas simples que flexionam ligeiramente quando submetidas a uma força ou peso e são essencialmente transdutores que convertem a força aplicada em um sinal elétrico. Quando uma carga é aplicada, o corpo da célula de carga irá se flexionar devido às propriedades elásticas do material metálico de que é feito (Flintec, 2025; Laumas, 2025).

Foram adquiridos uma célula de carga de viga de flexão capaz de suportar 20 kg e um circuito conversor de sinal HX711, comumente utilizado em circuitos de condicionamento de sinais para balanças, para cada um dos dois instrumentos de medição implementados. Para a parte estrutural do dispositivo, foi desenvolvida uma estrutura mecânica constituída de MDF (*Medium Density Fiberboard*) e cortada à laser. O desenvolvimento da estrutura seguiu um processo iterativo de prototipagem e refinamento utilizando SOLIDWORKS. Os modelos mecânicos estão representados na Figura 4 à esquerda e, à direita, está retratada a montagem do modelo final utilizado.

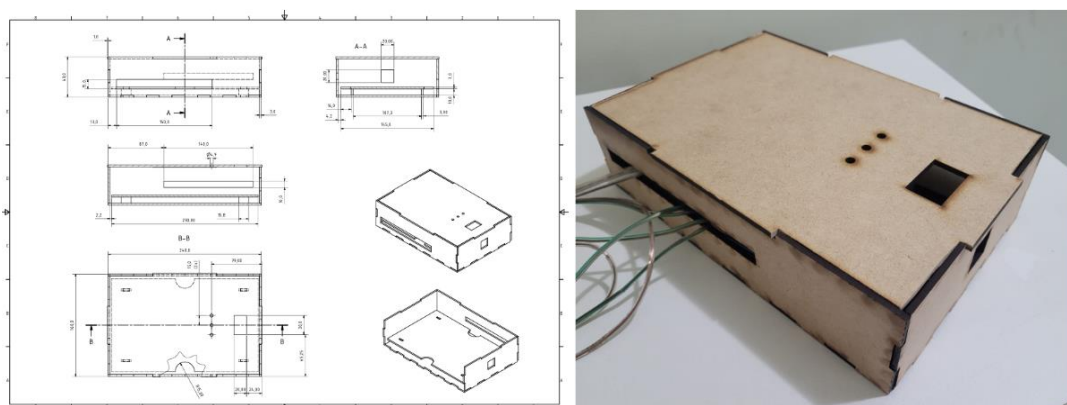
Figura 4 – Modelo da balança, à esquerda, e versão final, à direita.



Fonte: Autor.

Para comportar o circuito eletrônico, também foi desenvolvido uma estrutura de cobertura para manter os equipamentos eletrônicos protegidos e mais organizados, mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Desenho do recipiente, à esquerda, e montagem final, à direita.



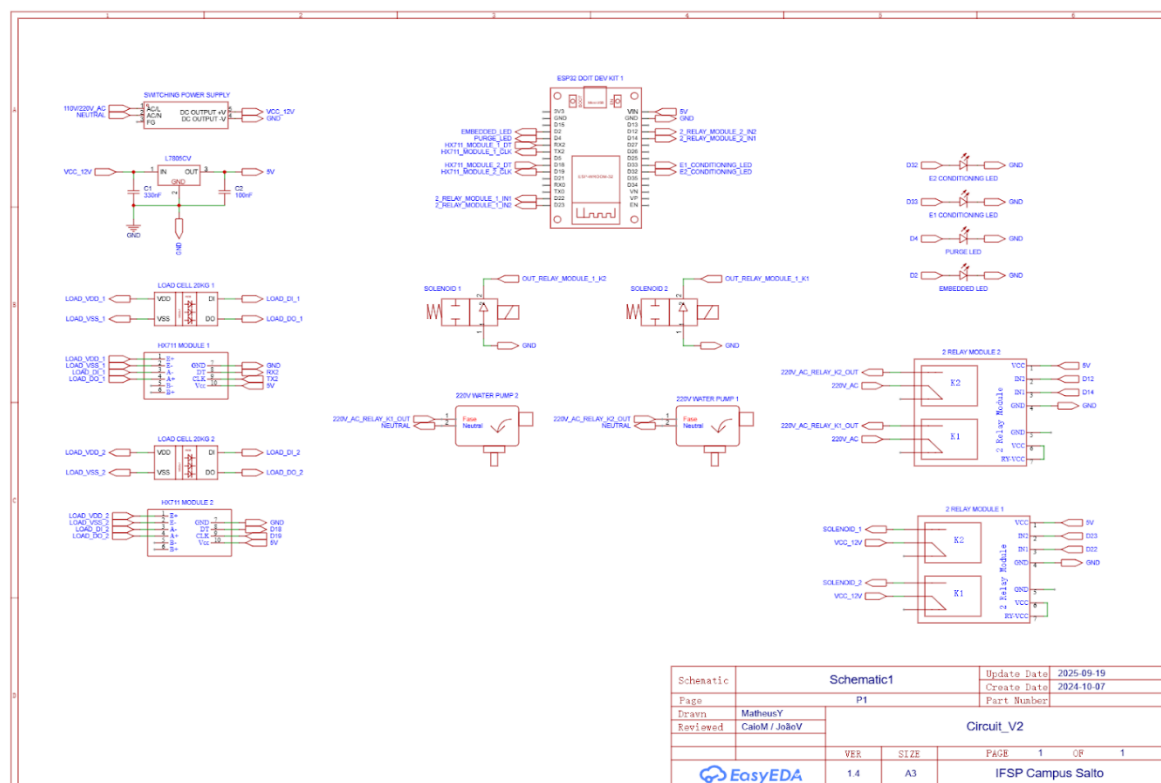
Fonte: Autor.

Como este recipiente não necessita de estrutura mais forte como as balanças, foi utilizado MDF de 3 mm como material e também foi cortada à laser. Este invólucro foi montado muito similarmente à estrutura da balança, sendo colado e com uma chapa de MDF encaixada por dentro com pequenos suportes, também cortados em MDF, para suportar os componentes eletrônicos parafusados à chapa com parafusos auto atarraxantes. Foi escolhido um design com o tampo de remoção por encaixe, para facilitar o acesso aos componentes internos.

CIRCUITO ELETROELETRÔNICO

O circuito eletrônico foi concebido para realizar o condicionamento de tensão elétrica para alimentação do microcontrolador utilizado e para gerenciar os dispositivos de acionamento. O design do circuito foi desenvolvido com o software EasyEDA, a fim de gerar uma representação refinada da eletrônica. O circuito está representado na Figura 6, e demonstra todos os subsistemas desenvolvidos.

Figura 6 – Esquemático do circuito eletrônico de controle



Fonte: Autor.

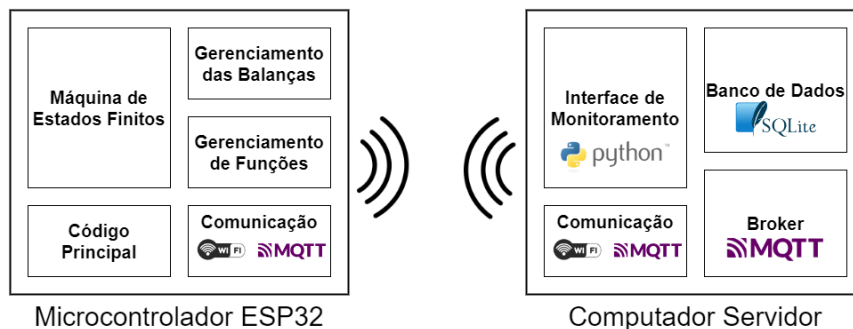
O protótipo eletrônico foi desenvolvido utilizando uma fonte chaveada comercial de 12 V em corrente contínua (CC) como alimentação principal, a partir de uma entrada de 100 a 240 V em corrente alternada (CA). A escolha dos 12 V deve-se à necessidade de alimentar diretamente as válvulas solenoides usadas para o escoamento da água. Para suprir o microcontrolador e os módulos de relés, ambos de 5 V, foi implementado um circuito de regulação de tensão simples. Este circuito utiliza o regulador LM7805 para converter os 12 V em 5 V, garantindo 1 A de corrente de saída, e inclui capacitores de poliéster de 0.33 uF na entrada e 0.1 uF na saída para filtragem e condicionamento do sinal. O sistema de alimentação foi inicialmente testado em placa de ensaio e, em seguida, montado em uma placa de circuito impresso para facilitar as conexões e melhorar a distribuição de energia.

O circuito de acionamento para as válvulas solenoides e bombas é composto por dois módulos comerciais de relés com entrada de 5 V e acionamento optoacoplado, o que garante isolamento elétrico entre o microcontrolador e a parte de alta potência. A simulação do sistema de adsorção envolve o uso de micro válvulas solenoides de 12 V em CC e bombas de água para aquário de 220 V em CA, adaptadas em recipientes reutilizados. As válvulas solenoides requerem uma pressão de escoamento muito próxima de zero, o que foi validado pelo cálculo da pressão da coluna d'água dentro da garrafa (2,943 kPa ou 0,426 psi). As bombas de 220 V foram usadas por conveniência e, idealmente, seriam substituídas por bombas de 12 V em CC em uma versão final do projeto, e elas exigem que o reservatório de água (de, no mínimo, 2 litros) mantenha o líquido cobrindo o equipamento durante a operação.

LÓGICA DE CONTROLE

Para contemplar o desenvolvimento de software do protótipo, foi empregada a arquitetura apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Esquemático do circuito eletrônico de controle



Fonte: Autor.

Esta imagem descreve, em blocos, cada uma das partes desenvolvidas e aplicadas na programação do microcontrolador, dentro do sistema embarcado, e de toda a infraestrutura de software aplicada no computador servidor.

O microcontrolador utilizado neste protótipo foi o modelo ESP32-DOIT-DEVKIT-V1, uma placa de desenvolvimento que é construída ao redor do módulo ESP32-WROOM-32 da Espressif.

No que tange à linguagem de programação, para melhor controle das funcionalidades desenvolvidas e implementação de comandos mais completos, foi escolhida a linguagem C++. Como o método de controle escolhido, baseado em máquinas de estados finitos, é de arquitetura mais complexa, a linguagem C++ fornece mais ferramentas para o desenvolvimento, principalmente na reutilização de funções e tipos entre arquivos e na inicialização de bibliotecas.

A programação do dispositivo foi desenvolvida com o Visual Studio Code como principal interface de desenvolvimento. Ferramentas como o PlatformIO e extensões aplicadas ao software foram de suma importância para tornar o processo de desenvolvimento mais eficiente e organizado. O PlatformIO funciona como um ambiente de desenvolvimento para circuitos embarcados aplicado ao Visual Studio Code.

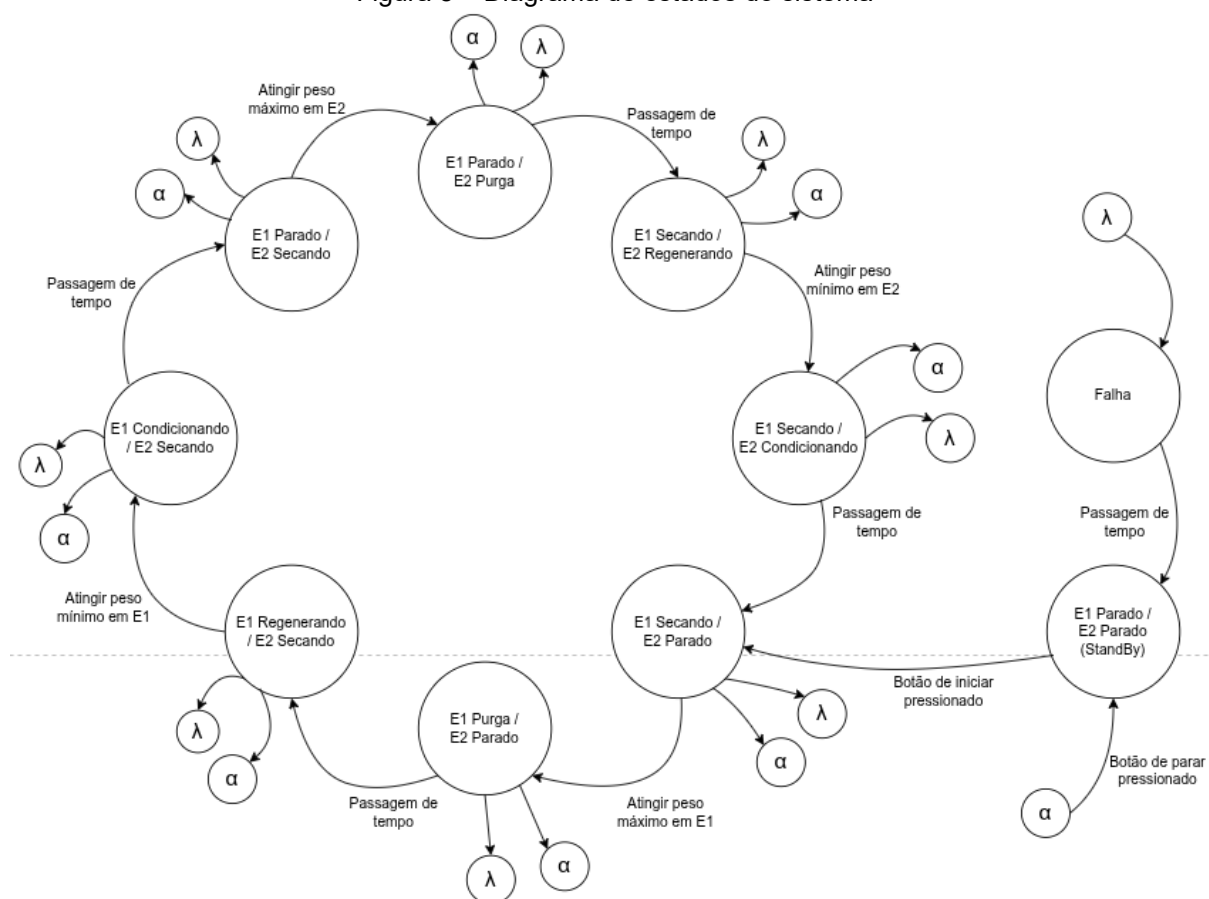
Para o gerenciamento do funcionamento do protótipo, foi desenvolvido um código com uma máquina de estados finitos, apresentada na Figura 7, utilizando como base um sistema real de adsorção. Este método de desenvolvimento é essencialmente um programa que representa uma sequência de instruções a ser

executada, de onde cada instrução depende do estado atual da máquina e do evento atual (Alavi; Aliaga; Murga, 2016).

Como a proposta deste protótipo é simular o funcionamento do sistema com este tipo de metodologia de controle, não foram considerados estados de falha para atuação do sistema de emergência.

A máquina deste projeto é considerada assíncrona, pois suas alterações de estados não necessitam de comandos temporizados e sim comandos direcionados por alterações nas transições de cada estado. Mesmo que em alguns casos a alteração desses estados seja causada após uma quantidade de tempo passado, elas não dependem de uma temporização global que dita todo o funcionamento do sistema.

Figura 8 – Diagrama de estados do sistema



Fonte: Autor.

Conforme mencionado anteriormente, as balanças são baseadas em células de carga de viga de flexão e seu sinal é condicionado por amplificadores conversores

de sinais HX711. Com estas características, foi utilizada a biblioteca de Bodge (2022) para realizar as funcionalidades necessárias para controlar as balanças. Foram implementadas funcionalidades para tarar, leitura de valores brutos, leitura de peso e para colocar um fator de calibração. Essa definição do fator foi realizada com base em um peso conhecido em quilogramas e com a leitura do valor bruto fornecido pela biblioteca e o seu resultado é um número sem unidade. A fórmula utilizada para realizar este cálculo é descrita abaixo:

$$\text{Fator de Calibração} = \frac{\text{Leitura do HX711}}{\text{Peso Conhecido}}$$

Este cálculo foi realizado para cada uma das duas balanças, pois o fator de calibração é intrínseco à cada célula de carga. Dessa forma, foi obtido um fator de calibração de 103680 para a primeira unidade construída e um fator de 96800 para a segunda unidade. Em ambas as calibrações foi utilizada uma garrafa PET cheia de água que teve sua massa medida previamente em uma balança comercial de tolerância de $\pm 5g$ e apresentou o valor de 1 kg.

ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO

O computador servidor é o dispositivo que recebe as informações transmitidas via MQTT pelo sistema embarcado, trata os dados, mostra no sistema supervisório e armazena em banco de dados. O MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um método de comunicação leve, simples e de fácil instalação para realizar publicação e recebimento de mensagens.

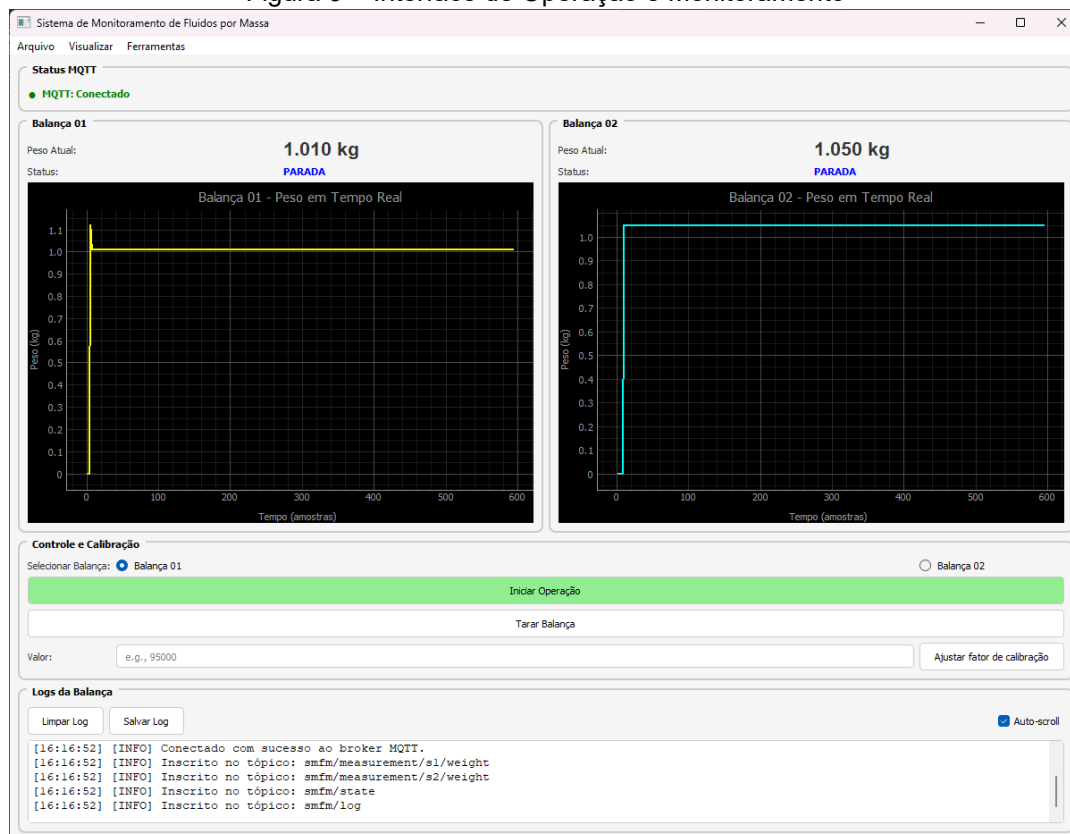
Este método de comunicação foi implementado para funcionar via WiFi para maior versatilidade do sistema e para ser compatível com métodos utilizados em ambientes industriais. Do lado embarcado, a configuração de WiFi é feita no código principal e o gerenciamento da conexão e envio de mensagens MQTT e o tratamento de mensagens recebidas do servidor são feitos em códigos próprios.

INTERFACE DE MONITORAMENTO

Para visualizar a variação dos pesos das balanças durante a operação do sistema, foi desenvolvida uma interface capaz de mostrar gráficos com o peso e o estado atual do sistema, além de ser capaz de enviar comandos para tarar as

balanças e iniciar ou parar a operação a qualquer momento. Seu desenvolvimento foi feito em Python, utilizando como principal biblioteca o PyQt5, que é um conjunto de ferramentas para desenvolvimento de interfaces baseadas em Qt, uma ferramenta para criação de interfaces desktop (Riverbank Computing, 2025).

Figura 9 – Interface de Operação e Monitoramento



Fonte: Autor.

BANCO DE DADOS

Para armazenar os dados adquiridos de pesos durante os testes do projeto, foi escolhido o SQLite, um banco de dados relacional leve e de simples preparação e aplicação. Este modelo de banco de dados pode ser instalado separadamente ou pode ser utilizado por meio de uma biblioteca do Python (Python Software Foundation, 2025; SQLite, 2025). Todos os valores serão armazenados em um arquivo específico que contém a configuração do banco de dados e os dados armazenados, que podem ser tratados em outros códigos para análise posterior. A Tabela 2 mostra a arquitetura de dados do banco para exemplificar o formato de armazenamento e os tipos utilizados.

Tabela 1 - Visualização dos tipos de dados armazenados

	ID	BALANÇA	TEMPO	VALOR
TIPO DE DADO	Inteiro	Texto	Texto	Ponto Flutuante

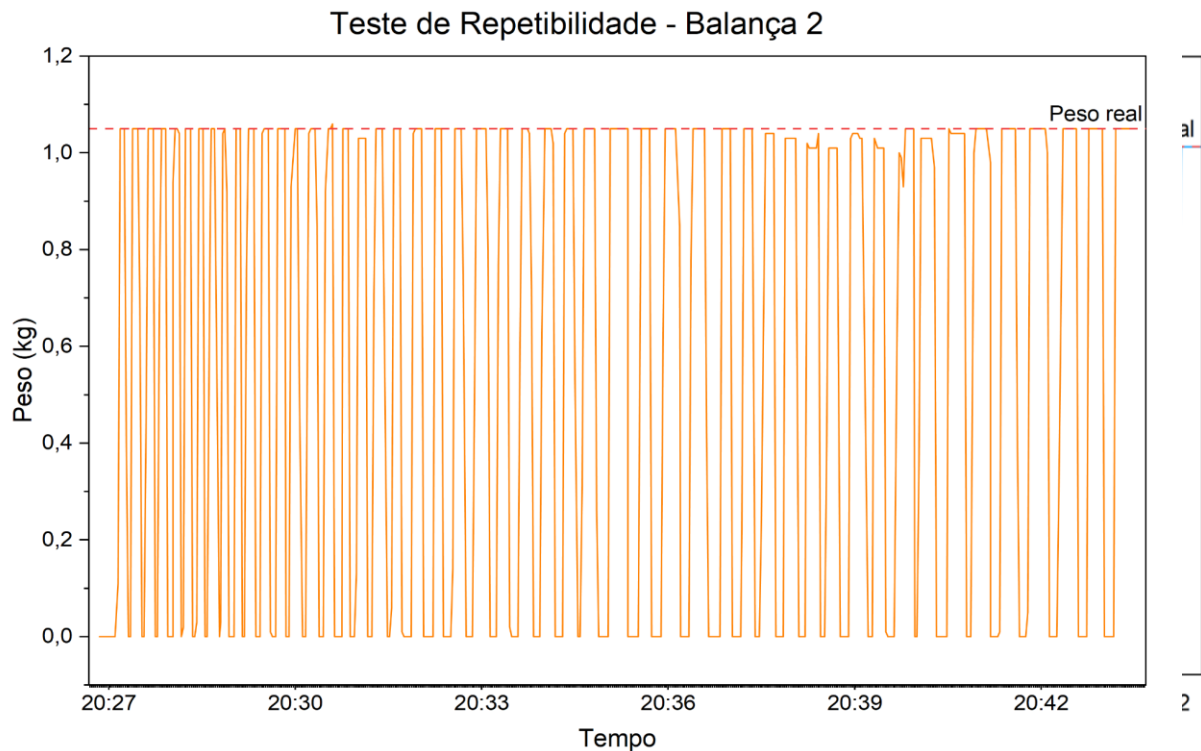
Fonte: Autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise da instrumentação de medição foram analisadas três principais características do dispositivo desenvolvido: repetibilidade, estabilidade e robustez. Cada um dos testes foi realizado utilizando a interface de monitoramento desenvolvida como principal indicador visual do desempenho e foram utilizados os dados adquiridos pelo sistema, armazenados no banco de dados, para caracterizar a resposta às situações de teste.

O teste de repetibilidade foi realizado utilizando-se dois pesos conhecidos, medidos previamente com uma balança comercial, sendo posicionados e removidos repetidamente por 50 vezes. Para a balança 1 foi utilizada uma garrafa cheia de água com o peso de 1,01 kg e para a balança 2 foi utilizada também uma garrafa de água com 1,05 kg.

Figura 10 – Dados adquiridos no teste de repetibilidade



Fonte: Autor.

Tabela 2 - Resultados do teste de repetibilidade

Balança	Desvio Padrão (kg)	Média (kg)	Variação Máxima (kg)
1	0,004	1,011	0,05
2	0,011	1,045	0,05

Fonte: Autor.

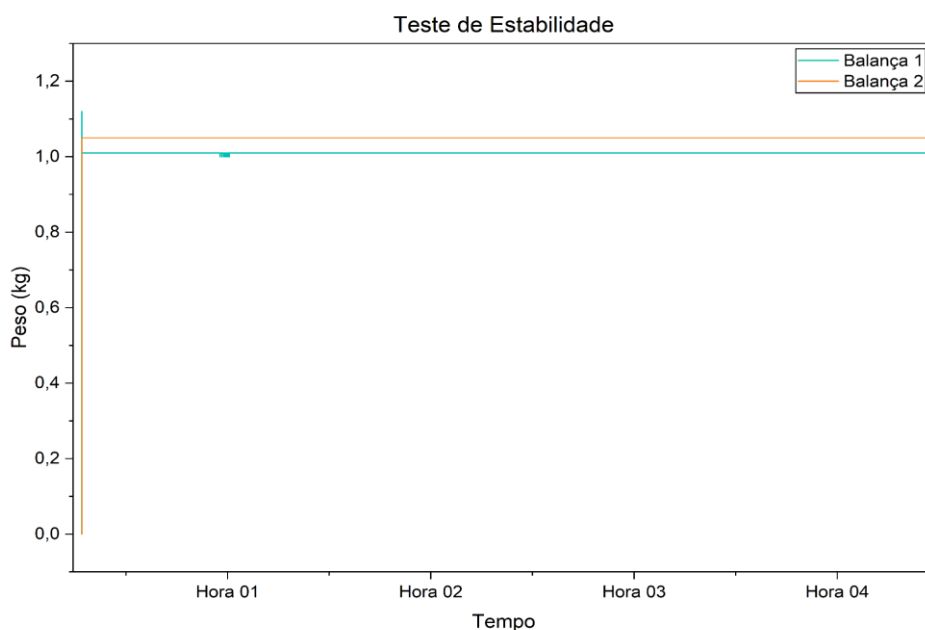
De acordo com os dados apresentados, é possível notar que não há variação significativa entre aquisições ao longo do teste, bem como o desvio padrão de 0,004 kg na balança 1 e de 0,011 kg na balança 2 e a variação máxima de 0,05 kg em ambas evidenciam que o sistema de aquisição da instrumentação mantém sua característica.

Para caracterizar a estabilidade das balanças, foi realizada uma aquisição com os mesmos pesos conhecidos dos testes anteriores durante 4 horas para evidenciar se havia variação do mesmo peso ao longo do tempo. A Figura 10 mostra os resultados do teste para os dois dispositivos. Com os resultados obtidos, é possível

mostrar que as balanças são estáveis o suficiente em operações de longo prazo, visto que a variação máxima percebida é de 0,01 kg.

Para o teste de robustez, conforme a Figura 11, foram utilizados alguns pesos conhecidos como as garrafas utilizadas no protótipo cheias de água, com cerca de 4,5 kg e pesos de laboratório que, somados, atingem cerca de 11 kg.

Figura 11 – Dados adquiridos para o teste de estabilidade



Fonte: Autor.

Figura 12 – Gráficos de cada um dos testes de robustez



Fonte: Autor.

MÁQUINA DE ESTADOS FINITOS

O objetivo dos testes da máquina de estados finitos foi de comprovar seu funcionamento quanto à metodologia de controle voltada ao gerenciamento dos pesos de referência como variação da saturação da sílica gel em simulação. Para isso, foram realizados dois testes principais de acionamento: a validação do ciclo de acionamento da máquina de estados e a análise do tempo de acionamento entre estados. Com base nos testes realizados, foi possível caracterizar que esta metodologia de controle funciona muito bem dentro do ciclo esperado.

COMUNICAÇÃO MQTT

O principal critério utilizado para avaliar o funcionamento da comunicação foi o estudo da latência entre mensagens. Em testes de velocidade, foram observadas latências médias de 10 ms, o que satisfaz completamente para ambientes de testes e corresponde com o esperado de acordo com a documentação da ferramenta. A latência do broker MQTT Mosquitto não influenciou nas medições, sendo a velocidade da troca de mensagens limitada à velocidade de aquisição do HX711 no processamento de medidas.

IMPLEMENTAÇÃO ELETROELETRÔNICA

A infraestrutura eletrônica utilizada funcionou plenamente e não apresentou problemas para acionamentos dos dispositivos relacionados.

SISTEMA SUPERVISÓRIO

Como instrumento de visualização de dados e monitoramento remoto do funcionamento do protótipo, a interface desenvolvida se provou eficiente e funcional para esta versão do sistema. Além da visualização ao longo do tempo, esta interface permite com sucesso enviar comandos para iniciar e interromper a máquina de estados a qualquer momento, tarar e configurar fatores de calibração para as duas balanças.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento voltado para a análise de sistemas de secagem de ar comprimido baseados em adsorção. A instrumentação de medição de massa comprovou sua usabilidade no contexto do protótipo, além de reforçar o baixo custo do projeto. O controle baseado em máquina de estados finitos mostrou-se eficiente para representar as transições entre estados, condições de operação e comportamento do sistema de secagem, resultando em um comportamento previsível e de fácil análise. A combinação de MQTT e uma interface de monitoramento leve desenvolvida em Python se mostraram um conjunto valioso para operar e monitorar o sistema remotamente.

Em suma, a combinação do desenvolvimento da instrumentação eletrônica, da lógica de controle baseada em estados e o uso de tecnologias de comunicação atuais demonstram que é possível desenvolver sistemas industriais acessíveis, modulares e escaláveis.

No entanto, vale ressaltar que o protótipo apresentado neste artigo ainda não se adequa integralmente aos requisitos estabelecidos pelas Normas Regulamentadoras NR-10, NR-12 e NR-13, uma vez que os ensaios realizados nesta etapa foram direcionados principalmente à validação funcional da instrumentação, da lógica de controle e do sistema supervisor. Para sua aplicação em ambiente industrial, serão necessários ensaios complementares de segurança, confiabilidade e desempenho, bem como análise de riscos e validação dos sistemas de proteção e emergência, além das adequações construtivas e documentais pertinentes. Dessa forma, etapas adicionais de desenvolvimento e validação serão necessárias para comprovar a conformidade do sistema e possibilitar sua operação segura e legal em ambiente industrial.

REFERÊNCIAS

- AIR FILTER EUROPE. **Heatless compressed air adsorption dryer HDD Series**. Acesso em 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://airfilter-europe.com/wp-content/uploads/2018/01/AFE-brochure-adsorption-dryer-HDD-web.pdf>>.
- ALAVI, M; ALIAGA, S; MURGA, M. **Máquinas de Estado Finito**. 2016.

ALSHARIF, M. **Understanding Adsorption: Theories, Techniques, and Applications.** 2024.

BODGE. **HX711.** 2022. Acesso em: 15 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://github.com/bogde/HX711>>.

COMPRESSED AIR & GAS INSTITUTE. **Why Do Compressed Air Systems Need Drying?** 2023. Acesso em: 15 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.airbestpractices.com/technology/air-treatment/n2/why-do-compressed-air-systems-need-drying>>.

FLINTEC. **O que é uma célula de carga de viga?**. Acesso em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.flintec.com/br/aprender/sensor-de-peso/celulas-de-carga/vigas>>.

LAUMAS. Os principais tipos de células de carga. Acesso em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.laumas.com/pt/blog/produtos/os-principais-tipos-de-celulas-de-carga/>>.

NOXERIOR. **Air Drying by Dehydration Membranes.** 2025. Acesso em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.noxerior.com/technology/air-drying.html>>.

OMEGA AIR. **A-DRY desiccant adsorption compressed air dryers.** Acesso em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.omega-air.si/products/compressed-air-dryers/a-dry-desiccant-adsorption-compressed-air-dryers>>.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **sqlite3** — DB-API 2.0 interface for SQLite databases. 2025. Acesso em: 20 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/library/sqlite3.html>>.

RIVERBANK COMPUTING. **What is PyQt?**. 2025. Acesso em: 19 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/>>

RUTHVEN, D. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes.** 1984

SQLITE. **What Is SQLite?** 2025. Acesso em 20 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://sqlite.org/index.html>>