

**44° SENAFOR**

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil  
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDR  
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis  
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura  
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025  
[www.senafor.com](http://www.senafor.com)

# Sensor de força de baixo custo para medir a força de estampagem profunda usando computação de borda

Fabio Tiburi MSc <sup>(1)</sup>  
Dr. Ing Lírío Schaeffer <sup>(2)</sup>  
Dr. Roderval Marcelino <sup>(3)</sup>

## RESUMO

A medição da força de um processo de estampagem profunda não é um procedimento novo em laboratório, mas no chão de fábrica isso é um desafio devido a muitos aspectos, como os custos dos instrumentos e o ambiente hostil para isso. Depois que a indústria 4.0 começa, a necessidade de medir o processo e a aquisição de dados é cada vez mais necessária. Este artigo mostra como projetar um sensor de baixo custo acessível para fazer essa aquisição de força em qualquer ferramenta ou equipamento de prensagem no chão de fábrica usando computação de borda. Os resultados mostraram que é possível ter os dados com sensores de baixo custo que apesar de não serem dados sofisticados, podem ajudar muito a produção.

**Key words** — Sensor de força, computação de borda, estampagem profunda, aquisição de dados.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o número de empresas que monitoram o processo produtivo vem aumentando. O número de empresas que oferecem produtos para realizar essa tarefa está crescendo rapidamente e os processos de conformação são os mesmos. Mesmo que o custo dos instrumentos para forçar a aquisição no processo de

---

<sup>1</sup> UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul.

<sup>2</sup> UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul

<sup>3</sup> UFSC-Universidade Federal de Santa Catarina

estampagem profunda ainda seja relativamente alto ou difícil de encontrar uma solução industrial. A maioria dos sistemas de medição de força é dedicada a processos de fabricação laboratoriais ou muito críticos, oferecendo dados de alta precisão, alta taxa de amostragem, que são usados para fins de pesquisa. Esses sistemas de aquisição são caros e delicados de usar no chão de fábrica.

O principal objetivo deste artigo é explorar uma maneira de projetar e produzir um sensor de baixo custo usando tecnologia de computação de borda para medir uma força de tração profunda. Este sensor pode ser aplicado diretamente em ferramentas de estampagem profunda que coletam dados e enviam para a nuvem para serem analisados usando um site. As informações de força serão usadas para monitorar o desgaste da ferramenta, melhorando a qualidade e a eficiência do processo de estampagem profunda.

## **2. ARQUITETURAS DE COMPUTAÇÃO**

As arquiteturas de computação estão evoluindo muito e se tornando descentralizada. Fala-se muito em computação em nuvem, névoa ou computação de borda. Cada uma destas arquitetura tem sua particularidade.

### **2.1. Computação em nuvem**

A computação em nuvem é um modelo para o fornecimento e uso de tecnologias de informação e comunicação. Eles fornecem acesso remoto a vários recursos de computação comuns na forma de serviços via Internet.

Este sistema de computador pode ser dividido em duas partes: dispositivos clientes e servidores. Existem também três tipos de nuvens. Este tipos de nuvens são chamados de serviços de TI: infraestrutura como serviço (IaaS), plataforma como serviço (PaaS) e software como serviço (SaaS) [1]. O uso destas tecnologias na manufatura e na indústria oferece oportunidades úteis para eficiência, conectividade, escalabilidade, comunicação entre sensores e sistemas de computação e aumenta a capacidade de armazenamento e processamento de dados.

### **2.2 Computação em névoa**

São sistemas computacionais usados para transportar os recursos de computação em nuvem para mais perto dos dispositivos. Geralmente são sistemas descentralizados no qual os dados são distribuídos entre fontes de dados e a nuvem. Essa é uma arquitetura horizontal que distribui recursos e serviços armazenados na nuvem para dispositivos. Em outras palavras, a computação em névoa pode ser entendida como uma camada intermediária que controla a conexão entre a nuvem e o perímetro da rede.

A diferença mais notável entre a computação em névoa e a computação em nuvem é: enquanto a computação em nuvem é um sistema centralizado, a computação em névoa é uma infraestrutura de sistema descentralizado distribuído. [1]

### **2.3 Computação de borda**

A computação de borda fica na fronteira entre uma planta industrial ou de produção e uma rede. Nessa arquitetura, os dados de origem são processados perto da origem sem serem enviados por longas distâncias (para a nuvem ou outros sistemas de processamento centralizados). Aumenta a transferência de dados para um sistema centralizado reduzindo a distância e o tempo de transferência de dados, bem como a velocidade e eficiência de dispositivos e aplicações.

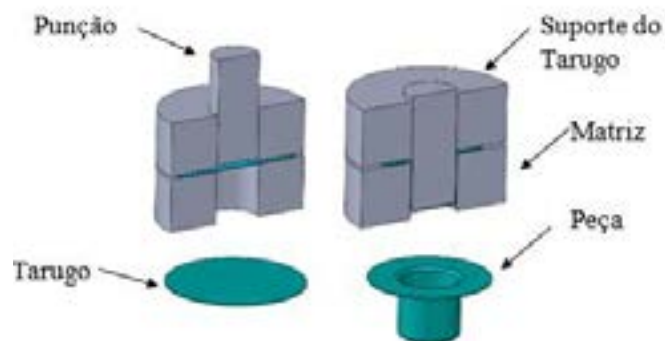
A principal diferença entre edge computing (computação de borda) e fog computing (computação de névoa) é onde os dados são processados. O processamento de borda é realizado diretamente em dispositivos equipados com sensores ou em gateways fisicamente próximos aos sensores. As vantagens da

computação de borda é a otimização de tempo de conexão e resposta aprimorados. Isso também melhora a segurança implementando a criptografia mais perto do centro de rede. No entanto, a Edge Computing tem um escopo limitado com base em padrões de processamento específicos e predefinidos que ocorrem no final da rede. [2]

### 3. FORÇA DA ESTAMPAGEM PROFUNDA

O processo de estampagem profunda é composto por um punção que pressiona uma chapa metálica contra uma matriz, criando uma forma desejável. A Figura 1 mostra detalhes do processo.

Este processo gera uma deformação de plasticidade que deforma mecanicamente a chapa metálica por uma força superior ao limite de deformação de elastina e menor que o limite de deformação.



**Figure 1:** Processo de estampagem profunda

Para calcular a força de estampagem profunda na conformação de chapas metálicas, você pode usar a seguinte fórmula:

$$F = \pi \cdot d \cdot t \cdot \sigma \cdot \left( \frac{D}{d} - 0.6 \right) \quad (1)$$

Onde:

- F é a força de tração
- d é o diâmetro do punção
- t é a espessura da folha
- $\sigma$  é a resistência à tração do material
- D é o diâmetro do suporte

Esta fórmula ajuda a estimar a força necessária para estampar um pedaço de chapa metálica em uma cavidade da matriz. A força de estampagem é influenciada pelas propriedades do material, espessura da chapa e dimensões do punção e da peça bruta [5].

### 4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE FORÇA DE PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

Enquanto as medições laboratoriais fornecem um ambiente controlado e preciso para entender o processo de estampagem profunda, as medições industriais oferecem uma avaliação mais realista do processo em condições reais de produção. Ambas as

abordagens são essenciais para otimizar o processo de estampagem profunda e garantir uma produção de alta qualidade. Na estampagem profunda, a distribuição de força é uma variável importante que determina a qualidade do componente formado. A força do suporte do tarugo é um parâmetro de projeto significativo no processo de estampagem profunda. Ajustar essa força pode ajudar a evitar defeitos como rugas, afinamento, rachaduras e deflexões de superfície. [3]

O uso de um sistema de aquisição de dados (DAS) pode ser usado para medir a força aplicada durante a estampagem profunda. Este sistema é uma composição de diferentes elementos para tornar os dados de aquisição de força atuais e confiáveis.

#### 4.1 Sensores de força e elementos de aquisição de dados

Estes dispositivos são elementos de medição projetados para a medição precisa das forças de compressão e tração.

- Sensores de força piezoelétricos:

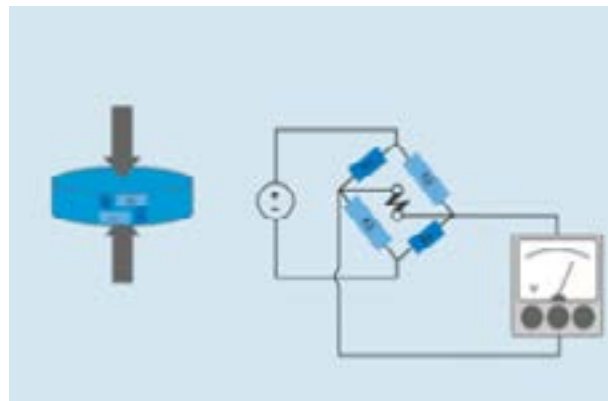
São baseados no princípio de medição piezoelétrica. Eles são adequados para medir forças (altamente) dinâmicas e quase-estáticas. A força que atua no quartzo embutido no sensor gera uma carga proporcional na saída do sinal. Um amplificador de carga a jusante converte isso em um sinal de processo que pode ser avaliado. Uma das vantagens especiais do elemento de medição piezoelétrico é sua precisão de medição constante em uma ampla faixa de medição, portanto, é possível usar um sensor muito grande para medir as menores forças com precisão de medição constante. Os sensores piezoelétricos também são caracterizados por um alto nível de proteção contra sobrecarga, eliminando a necessidade de medidas de proteção, especialmente em faixas de medição baixas. [6]

Os princípios piezoelétricos estão capturando carga elétrica pela força aplicada a um cristal piezoelétrico e causam uma mudança de carga no nível molecular e dentro da estrutura da rede. Essa carga elétrica é capturada na superfície do cristal e convertida em um sinal de tensão por meio do chamado amplificador de carga. A vantagem é que a deformação é extremamente pequena, pois o efeito de carga é causado por mudanças dentro da estrutura atômica. Isso permite a realização de estruturas extremamente rígidas com altas frequências naturais. Isso é ideal para capturar eventos de medição muito rápidos ou de alta frequência. A desvantagem é que a carga elétrica é muito volátil. Onde não há isolamento perfeito, a carga é perdida com o tempo. Isso dificulta as medições estáveis a longo prazo, especialmente se você quiser medir pequenas forças. Além disso, um sensor piezoelétrico está muito mais sujeito a mudanças de temperatura. [7]

- Sensor *strain gauge*:

Captura uma mudança na resistência elétrica induzida por deformação elástica. A força é aplicada a um corpo de mola, que se deforma proporcionalmente à força exercida. Essa deformação novamente causa compressão ou alongamento dos extensômetros conectados e, portanto, uma mudança em sua resistência elétrica. Usando um circuito de ponte de medição elétrica simples, um sinal de tensão utilizável pode ser gerado. A vantagem é que as medições são estáveis a longo prazo e as mudanças de temperatura podem ser melhor compensadas. Sensores com precisão muito alta podem ser realizados. A desvantagem é que a qualidade da aquisição do sinal melhora com o grau de deformação elástica dos extensômetros. Isso significa que sua estrutura é bastante macia, apresentando uma baixa frequência natural, o que é inadequado para eventos de medição mais rápida. Deformação, fadiga do material e a sobretensão são aspectos críticos adicionais deste princípio de medição.

São elementos de medição metaloelétricos que medem com precisão forças, cargas, torque, etc., particularmente em processos estáticos. Os *strain gauges* operam com base no efeito físico pelo qual a resistência elétrica de um fio muda proporcionalmente à tensão exercida no fio quando esticado ou comprimido. Os medidores de tensão são usados em sensores, sensores de força e torque, sensores de carga (para balanças) e outros dispositivos de medição. Os *strain gauges* são frequentemente afixados em corpos de medição feitos de material de alta resistência. A Figura 2 mostra um sensor em ação gerando um sinal para uma medição após uma força ser aplicada.



**Figure 2:** Medição de deformação profunda

- Amplificador de carga:

No campo da tecnologia de medição, um amplificador de carga é essencialmente um conversor de carga que converte sinais de carga muito baixa, como são gerados, por exemplo, por sensores piezoelétricos, em sinais de tensão proporcional (Volt).

- Filtro eletrônico:

Em geral, o termo filtro é entendido como o bloqueio ou passagem de certas faixas de frequência. Dessa forma, um filtro atua no domínio da frequência. A frequência de corte do filtro determina qual conteúdo do sinal é cortado ou pode passar. Um filtro idealizado corta o sinal de medição em uma determinada frequência de corte ou permite que o sinal de medição passe acima de uma determinada frequência de corte, por meio da qual é criada uma separação clara da faixa de frequência necessária. A frequência de corte separa a banda passante da banda de parada do filtro. Um filtro real sempre tem uma faixa de transição da banda passante para a banda de parada na faixa da frequência de corte. Na faixa de transição, os componentes de frequência já estão atenuados, mas não completamente suprimidos. A atenuação já começa nas frequências na banda passante e aumenta continuamente durante a transição para a banda de parada até que os componentes de frequência sejam eliminados. [3]

- Filtro passa-baixa

Com um filtro passa-baixa de, por exemplo, 150 Hz, todas as frequências acima de 150 Hz são cortadas. Assim, o sinal só é passado na faixa de frequência até a frequência de corte definida

- Filtro passa-alta

O comportamento oposto de um filtro passa-baixa se aplica ao filtro passa-alta. Se a frequência de corte for definida em 150 Hz, todas as frequências acima de 150 Hz são transmitidas

- Filtro passa-faixa

Com este tipo de filtro, duas frequências de corte devem ser definidas porque o filtro passa-banda é uma combinação de primeiro um filtro passa-alta seguido por um filtro passa-baixa. Como resultado, uma banda de frequência definida é considerada. Se a frequência de corte inferior for definida em 150 Hz e a frequência de corte superior em 300 Hz, o resultado é uma banda de frequência entre as duas frequências de corte que passa.

- Circuitos de condicionamento de sinal

Converta os sinais do sensor em uma forma que possa ser convertida em valores digitais. Conversores analógico-digital: Um conversor analógico-digital (ADC) converte um sinal de entrada analógico contínuo (por exemplo, voz de um microfone ou valores de medição de um sensor) em valores digitais discretos. Existem duas características principais que são importantes. A resolução vertical é dada pela chamada largura de bits do conversor: por exemplo, um ADC de 4 bits divide a faixa do sinal de entrada em  $2^4 = 16$  valores digitais. A partir de hoje, as larguras de bits comuns estão na faixa de 18 a 24. Portanto, o menor valor representável é muito menor do que os sinais de interferência que normalmente estão presentes, como por exemplo, ruído de sinal. A taxa de amostragem, às vezes também chamada de frequência de amostragem, é igual ao tempo entre duas amostras e, portanto, é a resolução horizontal no eixo do tempo. Quanto mais valores por unidade de tempo o conversor analógico-digital captura (geralmente declarados como amostras por segundo sps), mais rápido os sinais podem ser gravados. Mas isso implica que mais valores devem ser armazenados; Isso aumenta o requisito de memória. [3] As taxas de amostragem comuns situam-se na gama de apenas algumas amostras por segundo (por exemplo, para temperaturas) até vários milhões de amostras por segundo para sinais muito dinâmicos (por exemplo, explosões).

- Processamento de sinal

O processamento de sinais consiste em extrair informações de sinais pré-processados para tirar as conclusões corretas com base nessas informações. É feita uma distinção entre processamento de sinal analógico e digital.

Por exemplo, se você observar atentamente um sinal analógico de um sensor de força piezoelétrico, o sinal contém não apenas a curva de medição do processo real, mas também componentes de sinal parasitas, como sinais de ruído ou vibrações. Estes últimos têm sua origem na estrutura mecânica. Com o processamento de sinal adequado, a curva de medição do processo real pode ser filtrada.

Existem inúmeros métodos e ferramentas para obter informações importantes dos sinais. Ferramentas comuns no processamento de sinais analógicos, mas também digitais, são os filtros. Aqui, um sinal é processado de tal forma que os componentes indesejados do sinal são filtrados.

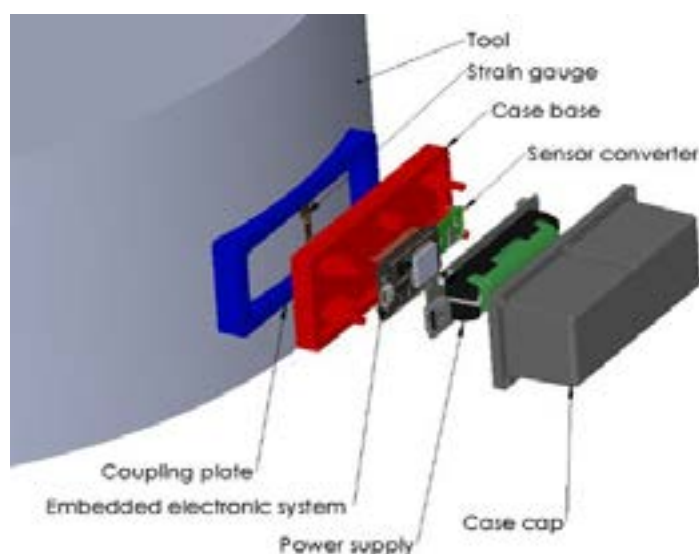
No processamento digital de sinais, as transformadas de Fourier - comumente chamadas de FFT (*Fast Fourier Transform*) - são muito comuns. As transformadas de Fourier são usadas para decompor sinais discretos, que geralmente estão no domínio do tempo, em seus componentes de frequência. Muitas vezes é mais fácil analisar sinais no domínio da frequência, o que é obtido com uma FFT.

A transição do condicionamento de sinal para o processamento de sinal geralmente é suave.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Design de hardware

Para construir o sensor de baixo custo e conectá-lo a uma ferramenta industrial para operação de estampagem profunda o sistema foi projetado com componentes discretos que incluem um sistema eletrônico incorporado, fonte de alimentação, um sensor, um conversor de sensor de tensão e um estojo. A Figura 3 apresenta os elementos do sistema.



**Figura 3:** IOT de baixo custo para medição de força em componentes de estampagem profunda

Este dispositivo deve ser forte o suficiente para suportar variações de temperatura, diferentes taxas de aceleração e campos eletromagnéticos gerados no ambiente de chão de fábrica para garantir a precisão e confiabilidade dos dados coletados. Neste estudo, os principais componentes são descritos a seguir:

#### a) Sistema eletrônico embarcado

O ESP32-WROOM-32U é um System-on-Module (SoM) baseado no microcontrolador ESP32, projetado pela Espressif Systems.

Características principais:

- Processador: Microcontrolador LX6 dual-core de 32 bits 240 MHz
- Wi-Fi 802.11 b/g/n e Bluetooth 4.2 BR/EDR e BLE
- Memória: 4 MB flash, 520 KB SRAM, 448 KB ROM
- Conectividade: Wi-Fi, BT, UART, I2C, I2S, SPI, GPIO
- Criptografia: AES, SHA, RSA, etc.
- Temperatura de operação: -40 ° C a 85 ° C
- Baixo consumo de energia: 5  $\mu$ A no modo de hibernação

**Vantagens:**

- Baixo custo
- Alto desempenho
- Baixo consumo de energia
- Fácil integração com outros dispositivos
- Suporte para vários protocolos de comunicação

**Especificações:**

- Dimensões: 18 x 25 x 3 mm
- Peso: 2 gramas
- Faixa de frequência: 2,4 GHz
- Certificação: FCC, CE, RoHS

O módulo ESP32-WROOM-32U é uma solução versátil e poderosa para projetos que requerem conectividade Wi-Fi e Bluetooth, processamento de dados e controle de dispositivos. Seu baixo consumo de energia e tamanho pequeno o tornam ideal para IoT e dispositivos vestíveis.

**b) Fonte de alimentação**

Este é um componente crítico para o sensor devido a possíveis sinais de ruídos e interferências eletromagnéticas que podem surgir na rede elétrica. Portanto, o uso de uma bateria foi escolhido para evitar estes problemas. Neste sensor, a fonte de alimentação utilizada foi a bateria blindada 1860 que é uma fonte de alimentação compacta e de alto desempenho projetada para várias aplicações, incluindo dispositivos industriais, médicos e IoT. Seu design blindado minimiza a interferência eletromagnética (EMI) e a interferência de radiofrequência (RFI).

**Características principais:**

- Alta eficiência (até 85%)
- Baixo consumo de energia em espera
- Tamanho compacto (1,86" x 0,74" x 0,43")
- Design blindado para redução de EMI e RFI
- Proteção contra sobretensão (OVP)
- Proteção contra curto-circuito (SCP)
- Alta confiabilidade e longa vida útil

**Especificações:**

- Tensão de entrada: 85-265 VAC
- Tensão de saída: 3,3 V, 5 V, 12 V
- Corrente de saída: Até 6A
- Potência: até 120W
- Temperatura de operação: -20 ° C a 70 ° C
- Certificações: UL, CE, RoHS.

**c) Medidor de tensão**

Como mencionado anteriormente, para capturar a força, é possível usar o sensor de deformação. Neste caso, foi usado o strain gauge Kyowa HFG-5-350-C1-11:

**Características principais:**

- Tipo: Medidor de tensão elétrico, tipo filme fino.
- Material: Constantan (liga de cobre-níquel).

- Largura: 5 mm.
- Comprimento: 350 mm.
- Resistência: 350  $\Omega$ .
- Sensibilidade:  $2,1 \pm 0,5\%$  (mV/V).
- Faixa de temperatura:  $-200^\circ\text{C}$  a  $200^\circ\text{C}$ .
- Precisão:  $\pm 0,5\%$  do valor medido.

#### Benefícios:

- Alta precisão: medições precisas de deformação.
- Estabilidade: Resistente a variações de temperatura e umidade.
- Flexibilidade: Adequado para superfícies curvas e irregulares.
- Baixo custo: Em comparação com outros strain gauges de alta precisão.
- Fácil instalação: adesivo forte e durável.
- Compatível com sistemas de aquisição de dados padrão.
- Resistente ao desgaste e à corrosão.

#### Aplicativos

- Estampagem profunda: Medição de deformação em chapas metálicas.
- Teste de material: Análise de propriedades mecânicas.
- Engenharia Estrutural: Monitoramento de deformações em estruturas.
- Aeroespacial: Medição de tensão em componentes críticos.
- Automotivo: Teste de componentes e estruturas.

#### d) Conversor de sensor

Considerando esta aplicação de sensor de baixo custo, uma das partes mais caras é o conversor de sensor ou, como sabe, o registrador de dados. Neste sensor foi utilizado o amplificador de strain gauge HX711:

#### Especificações técnicas:

- Tipo: conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits e amplificador.
- Faixa de entrada:  $\pm 20\text{ mV}$  a  $\pm 40\text{ mV}$ .
- Ganho: 128x ou 64x programável.
- Resolução: 24 bits (1:16.777.216).
- Taxa de amostragem: até 80 Hz.
- Tensão de operação: 2,7 V a 5,5 V.
- Consumo de corrente: 1,5  $\mu\text{A}$  (standby), 1,5 mA (ativo).

#### Benefícios:

- Alta precisão e exatidão.
- Baixo ruído e alta relação sinal-ruído.
- Compacto e leve.
- Fácil integração com microcontroladores.
- Baixo consumo de energia.
- Adequado para várias configurações de strain gauge.

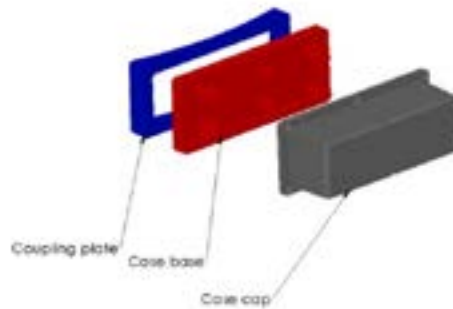
#### Aplicativos:

- Medição de peso: balanças, balanças e células de carga.
- Medição de deformação: Monitoramento estrutural, teste de material.
- Medição de força: Automação industrial, robótica.
- Dispositivos médicos: Monitoramento de pacientes, pesquisa médica.

- Aeroespacial: Monitoramento da integridade estrutural.

#### e) Embalagem

Para construir todas as caixas para o sensor, foi utilizada uma impressora de filamento 3D. Este caso está dividido em três partes. Acoplamento de base para conectar na ferramenta, caixa de base para segurar todos os componentes e tampa da caixa para proteger todos os componentes(Figura 4).



**Figura 1:** Componentes da embalagem

## 5.2 Arquitetura de software

### *Arquitetura de microsserviços*

A arquitetura de microsserviços foi escolhida para o sistema de sensores de baixo custo para melhorar a escalabilidade e a manutenção. Ao dividir o sistema em serviços menores e independentes, cada serviço pode ser desenvolvido, implantado e dimensionado de forma independente. Essa abordagem é particularmente benéfica para sensores de baixo custo, pois permite atualizações e melhorias incrementais sem interromper todo o sistema. Além disso, facilita a solução de problemas e a manutenção, o que é crucial para manter os custos baixos.

### *Padrão MVC (Model-View-Controller)*

O padrão MVC foi implementado para separar as preocupações dentro do aplicativo, facilitando o gerenciamento e o dimensionamento. Para um sistema de sensor de baixo custo, essa separação é vital, pois permite que os desenvolvedores trabalhem em diferentes partes da aplicação simultaneamente sem interferência. O modelo lida com os dados e a lógica de negócios, a exibição gerencia a interface do usuário e o controlador processa a entrada do usuário e atualiza o modelo e a exibição. Essa divisão clara de responsabilidades simplifica o desenvolvimento e a manutenção, reduzindo os custos gerais.

### *RESTful API*

Uma API RESTful foi usada para simplificar a programação de aplicativos, fornecendo uma maneira padronizada de interagir com o sistema. Para um sensor de baixo custo, isso é essencial, pois garante que o sistema possa se comunicar facilmente com outros dispositivos e serviços. As APIs RESTful usam métodos HTTP padrão, tornando-as fáceis de implementar e usar. Essa simplicidade reduz o tempo e os custos de desenvolvimento, tornando-a a escolha ideal para sistemas de sensores de baixo custo.

Ao empregar esses princípios arquitetônicos, o sistema de sensores de baixo custo atinge um equilíbrio entre escalabilidade, facilidade de manutenção e economia, garantindo desempenho confiável e facilidade de uso.

### 5.3 Fluxo de dados

#### *Coleta dados do sensor*

O dispositivo ESP32 lê duas portas analógicas de conversores de sensores que recebem sinais de *strain gauge*. Reúne a deformação axial e radial. Esses sensores monitoram continuamente o ambiente e coletam dados em tempo real com uma taxa de amostragem de 100Hz.

#### *O dispositivo transmite dados para a API*

Depois que os dados são coletados e processados, o dispositivo ESP32 os transmite para a API. Essa transmissão é feita usando protocolos de comunicação como HTTP ou MQTT. O HTTP é um protocolo amplamente utilizado para enviar dados pela Internet, enquanto o MQTT é um protocolo de mensagens leve, ideal para dispositivos IoT. Os MQTT foram escolhidos por serem mais rápidos e de baixa latência em comparação com o HTTP.

#### *API processa dados*

A API, criada usando o *Spring Boot*, recebe os dados de entrada do dispositivo. Ele processa esses dados para garantir que estejam no formato correto e prontos para armazenamento. Esse processo inclui tarefas como validação, transformação e agregação de dados. A API atua como intermediária, garantindo que os dados estejam limpos e estruturados antes de serem armazenados no banco de dados.

#### *API armazena dados no banco de dados PostgreSQL*

Depois de processar os dados, a API os armazena em um banco de dados PostgreSQL. O PostgreSQL é um poderoso sistema de gerenciamento de banco de dados relacional de código aberto, conhecido por sua confiabilidade e escalabilidade. A API usa consultas SQL para inserir os dados processados nas tabelas apropriadas no banco de dados. Isso garante que os dados sejam organizados e facilmente acessíveis para uso futuro.

#### *O banco de dados armazena dados para consulta e análise*

O banco de dados PostgreSQL armazena os dados coletados, disponibilizando-os para consulta e análise. Os usuários podem executar consultas SQL para recuperar pontos de dados específicos ou gerar relatórios com base nos dados armazenados. Esses dados podem ser usados para várias finalidades, como monitorar condições ambientais, analisar tendências ou tomar decisões baseadas em dados. Os recursos robustos de consulta do banco de dados permitem recuperação e análise de dados eficientes.

### 5.4 Sistema para sensor de baixo custo

#### *Dispositivo de aquisição de dados (Arduino)*

- **Software:** C++/Arduino IDE
- **Função:** Coletar dados do sensor (goivagem de tensão) e transmiti-los ao servidor. A plataforma eletrônica de código aberto da Arduino facilita os projetos de IoT, fornecendo um ambiente versátil e fácil de usar para o desenvolvimento de aplicativos baseados em sensores

#### *API (Spring Boot)*

- **Linguagem:** Java
- **Estrutura:** Spring Boot
- **Função:** Receba dados do dispositivo, processe-os e armazene-os em um banco de dados. O Spring Boot fornece uma estrutura robusta e escalável que simplifica o desenvolvimento de aplicativos prontos para produção com configuração mínima. Sua flexibilidade e eficiência são cruciais para manter baixos custos operacionais.

#### *Banco de dados (PostgreSQL)*

- **Sistema de gerenciamento de banco de dados:** PostgreSQL
- **Versão:** 13.2
- **Função:** Armazenar dados coletados. O PostgreSQL garante gerenciamento de dados confiável e escalável com recursos avançados, como conformidade com ACID, consultas complexas e extensibilidade. Sua natureza de código aberto ajuda a manter os custos baixos, ao mesmo tempo em que fornece recursos poderosos de banco de dados.

#### *Servidor (Ubuntu)*

- **Sistema operacional:** Ubuntu Server
- **Versão:** 20.04 LTS
- **Função:** API de host e banco de dados. O Ubuntu Server oferece estabilidade e segurança, tornando-o a escolha ideal para hospedar aplicativos e serviços. Sua natureza de código aberto e versão LTS (suporte de longo prazo) garantem um ambiente de servidor econômico e confiável.

#### *Armazenamento de dados no Oracle Cloud*

Os dados coletados pelo sistema de sensores de baixo custo são armazenados no Oracle Cloud em uma máquina virtual (VM) executando o Ubuntu. Essa configuração oferece vários benefícios:

- **Escalabilidade:** O Oracle Cloud oferece recursos escaláveis, permitindo que o sistema lide com quantidades crescentes de dados sem custos adicionais significativos.
- **Custo-benefício:** Usar uma VM com Ubuntu no Oracle Cloud é uma solução econômica, pois aproveita o software de código aberto e a infraestrutura em nuvem para minimizar as despesas.

- **Confiabilidade:** O Oracle Cloud fornece um ambiente confiável e seguro para armazenamento de dados, garantindo que os dados coletados estejam seguros e acessíveis quando necessário.

Ao escolher esses componentes e aproveitar o Oracle Cloud, o sistema alcança um equilíbrio de baixo custo, escalabilidade e confiabilidade, tornando-o uma solução ideal para aplicativos de sensores de baixo custo.

## 6. CÁLCULO DOS CUSTOS

Como dito anteriormente, este projeto visa tornar os sensores de menor custo possível para serem usados em larga escala em qualquer ferramenta em uma fábrica. Considerando todos os componentes descritos, o custo do hardware foi de US\$ 26,6. Veja a tabela 1. É uma análise importante que esse preço fosse o preço de varejo do usuário final, se esse sensor fosse construído em uma escala, o custo total seria pelo menos dez vezes menor do que o apresentado. Além disso, o custo de desenvolvimento não foi considerado nesta análise. Mas o tempo estimado para desenvolvê-lo foi de cerca de 300 horas para todo o design, código e teste.

**Tabela 1:** Levantamento de custos

Descrição	Qty	Custo unitário (US\$)	Custo subtotal (US\$)
Sistema eletrônico	1	5.2	5.2
Strain Gouge	2	3.2	6.4
Conversor de sensor	1	4.0	4.0
Fonte de alimentação	1	2.0	2.0
Caso	1	8.0	8.0
Fios, conexões etc.	1	1.0	1.0
Custo total			26.6

## 7. EXPERIÊNCIAS

Para testar tanto a computação de borda quanto a computação em nuvem neste sensor, algumas configurações foram necessárias realizar para os experimentos. Para melhores resultados foi utilizado o protocolo MQTT e todos os dados coletados foram enviados para a corretora em nuvem.

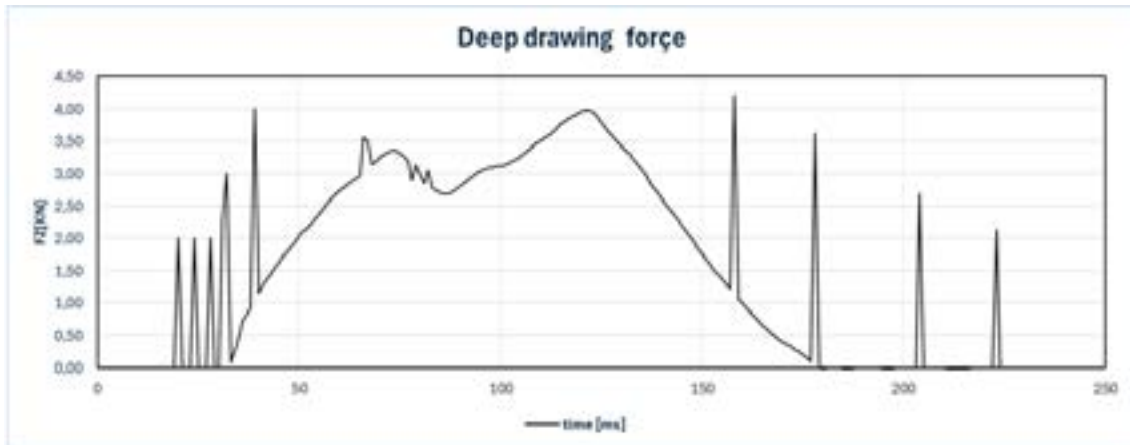
### 7.1 Computação em nuvem

O primeiro teste foi realizado com o algoritmo de firmware que lia uma porta analógica. Esta porta analógica recebia o sinal de uma placa conversora A/D do sensor de deformação e enviava esses dados de estampagem sem filtro matemático. Assim, qualquer ruído gerado durante o processo era enviado para a nuvem pela rede Wi-Fi.

Essa abordagem envia dados para a nuvem para processamento adicional e armazenamento de longo prazo usando conectividade com a Internet.

A nuvem oferece recursos escaláveis para realizar análises complexas, aprendizado de máquina e armazenamento de dados de longo prazo.

Após o recebimento dos dados, foi plotado um gráfico mostrado na Figura 5.



**Figura 5:** Gráfico dos sinais de leitura do sensor de deformação

Observe que na figura 5 existem alguns picos no perfil de estampagem profunda, ou seja, alguns ruídos gerados durante a operação de redesenho profundo.

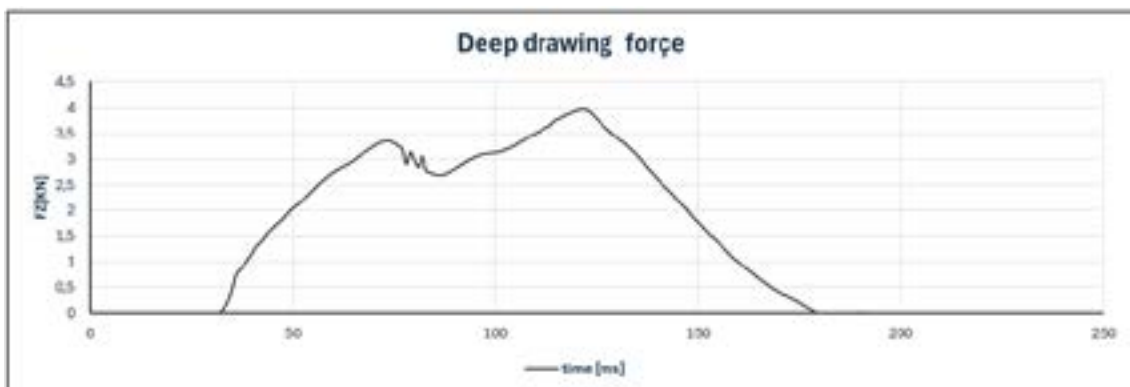
## 7.2 Computação de borda

Os segundos experimentos foram conduzidos usando o algoritmo de computação de borda no microcontrolador que se conecta à internet via Wi-Fi, mas antes disso, processa dados localmente na borda da rede, reduzindo a latência e permitindo respostas em tempo real. Os nós de borda lidam com necessidades imediatas de processamento, como filtragem de ruído digital.

O processamento de dados localmente ajuda a proteger informações confidenciais, minimizando sua exposição à Internet.

Ao processar dados localmente, a quantidade de dados enviados para a nuvem é minimizada, economizando largura de banda e reduzindo a latência.

Em seguida, os dados recebidos foram usados para plotar um gráfico mostrando a força de estampagem profunda por tempo. A Figura 6 mostra o sinal gerado com o filtro aplicado.



**Figura 2:** Força de estampagem profunda com filtro aplicado

## 8. CONCLUSÃO

A resolução da resposta da força de tempo descreve o processo de estampagem profunda adequado para aplicações industriais. No qual é a principal informação de força e suas variações características.

Depois deste projeto se concentrar na obtenção de dados usando sensores de força de baixo custo, é possível concluir que hoje é possível aplicar essa abordagem na tecnologia atual e na obtenção de resultados melhores para capturar dados de estampagem profunda, neste caso força, sem instrumentos de laboratório sofisticados e caros.

Esses dados não têm a mesma taxa de amostragem em comparação com os registradores de dados tradicionais, mas para a análise rápida do fenômeno durante o processo de estampagem profunda, é suficiente para agir e otimizá-lo.

A computação em nuvem não é adequada para este aplicativo devido a perdas de dados devido à latência da conexão e velocidade da Internet.

O uso de edge computing e o protocolo MQTT são indicados para medir a força da aplicação industrial devido ao menor armazenamento de dados e enviam apenas informações para a nuvem, não dados brutos de alto volume.

O uso de transmissão sem fio e fonte de alimentação da bateria evita a fiação na área do operador e diminui o corte de cabos e a manutenção do sensor. Mas a otimização do algoritmo e dos parâmetros do microcontrolador é um cuidado para a longa autonomia da bateria, evitando a frequência de recarga e a parada da prensa.

## 9. REFERÊNCIAS

- [1] Xu, Hansong & Yu, Wei & Griffith, David & Golmie, Nada. (2018). Uma pesquisa sobre a Internet das Coisas Industrial: Uma Perspectiva de Sistemas Ciberfísicos. Acesso IEEE. PÁG. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2884906.
- [2] Khujamatov K., Reypnazarov E., Khasanov D., Akhmedov N. Redes e Computação em Internet das Coisas e Sistemas Ciber-Físicos Universidade de Tecnologias da Informação de Tashkent
- [3] R.Minerva P, Maria Emanuela, F. Laura, G, Antonella, T. Luigi, Controle robusto do draw-in em um processo de repuxo profundo: uma abordagem baseada em medição
- [4] Minerva R., Biru A., Rotondi D. Rumo a uma definição da Internet das Coisas (IoT) // IEEE Internet Initiative. 2015. Nº 1. pág. 1-86. <https://iot.ieee.org/images/files/pdf/>
- [5] Merklin M., Gruner M. (2014). Determinação dos coeficientes de atrito em estampagem profunda pela modificação da fórmula de Siebel para o cálculo da força de desenho ideal.
- [6] Huda, Z. (2024). Estampagem profunda de chapa metálica. In: Processos de conformação de metais. Série de Engenharia Mecânica. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-56760-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-56760-5_12)
- [7] Lee EA, Seshia SA Introdução aos sistemas embarcados: uma abordagem de sistemas ciberfísicos. Londres, MIT Press Publ., 2016.
- [8] Siddikov I.Kh., Sattarov Kh.A., Khujamatov Kh.E. Modelagem dos Elementos de Transformação do Controle de Fontes de Energia // Internacional
- [9] Conferência sobre Aplicações, Tendências e Oportunidades de Ciência da Informação e Tecnologias de Comunicação (ICISCT), 2ª, 3ª e 4ª Xu, Hansong & Yu, Wei & Griffith, David & Golmie, Nada. (2018).
- [10] Uma pesquisa sobre a Internet das Coisas Industrial: Uma Perspectiva de Sistemas Ciberfísicos. Acesso IEEE. PÁG. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2884906.