



# CURUXIA

**"Sempre alerta"**

---

## **Reto**

Viaqua, InnovaTECH FP 2025

## **Autores**

Celia Incera

Martín Amor

Noelia Sánchez

Inés Poses

<b>CuruxIA</b>	<b>2</b>
<b>1. Resumo da solución proposta</b>	<b>2</b>
<b>2. Descrición da solución proposta</b>	<b>3</b>
2.1 Arquitectura do sistema	3
2.2 Innovación aportada	5
2.3 Técnicas e algoritmos empregados	5
2.4 Tecnoloxías aplicadas	6
<b>3. Análise da viabilidade técnica</b>	<b>7</b>
3.1 Especificacións do hardware	7
3.2 Software e algoritmos	7
3.3 Estrutura da conectividade	12
<b>4. Análise da viabilidade económica</b>	<b>13</b>
4.1 Orzamento e custos unitarios	13
4.2 Comparación con outras solucións comerciais	14
4.3 Estratexias para a optimización de custos	14
4.4 Escalabilidade e modularidade	14
4.5 Análise DAFO	15
<b>5. Valoración do impacto no ámbito rural</b>	<b>15</b>
5.1 Disminución de desprazamentos e emisións	15
5.2 Adaptabilidade a zonas con pouca conectividade	16
5.3 Prolongación da vida útil das máquinas	16
5.4 Potencial de expansión en industrias rurais	16
5.5 Durabilidade e redución de residuos	17
<b>6. Conclusión e próximos pasos</b>	<b>17</b>

## **1. Resumo da solución proposta**

O proxecto consiste no desenvolvemento dun sistema autónomo para a detección de anomalías acústicas en maquinaria industrial, empregando dispositivos Raspberry Pi con sensores de son Adafruit I2S MEMS. Cada máquina será equipada cun dispositivo que rexistrará sons diariamente durante unha semana, xerando un modelo inicial adaptado ao seu comportamento acústico.

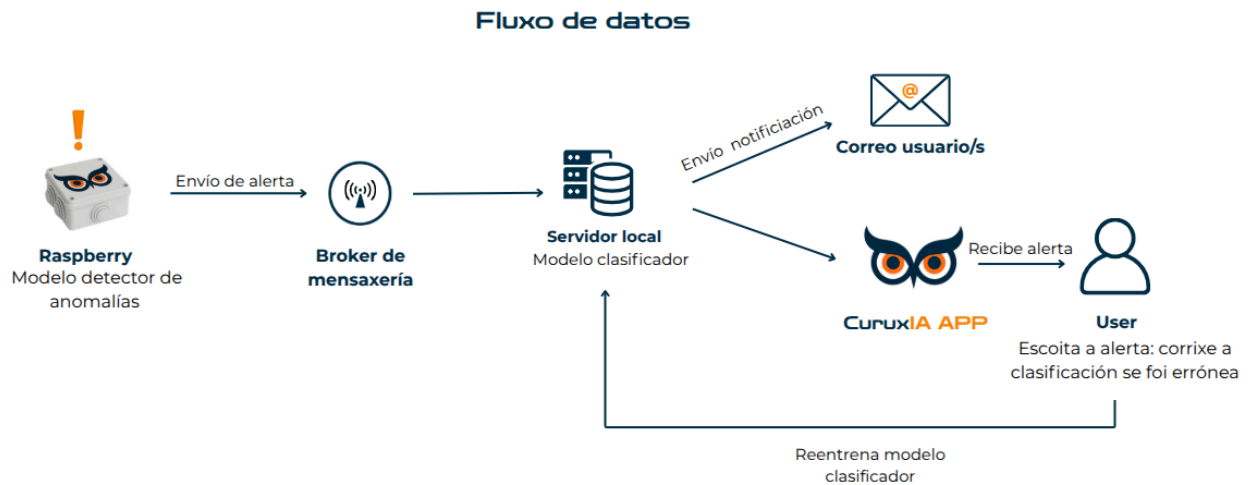
A detección baséase na análise comparativa de espectrogramas, que son representacións visuais do son, que mostran como as frecuencias cambian ao longo do tempo. Isto permite eliminar ruídos estacionais e identificar variacións relevantes sen necesidade de reentrenamento constante. Cando se detecta unha anomalía, rexístrase un audio de 10 segundos que se visualiza nun panel interactivo onde os técnicos poden supervisar a evolución sonora da máquina.

As máquinas organízanse por tipo (soplantes, bombas...), facilitando a identificación de patróns comúns e a predición de avarías mediante modelos de clasificación no servidor. Esta solución é especialmente útil en entornos de traballo remotos ou rurais, onde os técnicos só visitan as instalacións ocasionalmente, garantindo unha supervisión eficiente sen depender dunha conectividade continua.

## 2. Descrición da solución proposta

### 2.1 Arquitectura do sistema

O sistema estrutúrase en capas interconectadas que permiten a detección automática de anomalías:



- **Captación de son:** Cada máquina conta cunha Raspberry Pi 3 conectada a un sensor Adafruit I2S MEMS, que grava o son ambiente en períodos definidos.
- **Procesamento local:** Os audios convértense en espectrogramas, que son representacións visuais do son. Un modelo de autoencoder analiza estas imaxes para detectar desviacións respecto ao patrón normal da máquina.
- **Comunicación:** Cando se detecta unha anomalía, envíase unha alerta mediante un broker MQTT (Mosquitto sobre Docker), que garante unha comunicación eficiente e segura entre dispositivos.
- **Clasificación e xestión de alertas:** Un modelo de clasificación aloxado no servidor identifica o tipo de fallo. Durante a fase inicial, este modelo pode non dispoñer de datos suficientes para unha clasificación precisa, polo que se precisaría un breve período de mellora para que se acumulen casos reais e etiquetas validadas.
- **Visualización e interacción:** As alertas almacénanse nunha base de datos e notifícanse por correo aos técnicos responsables. A aplicación CuruxIA

proporciona un panel de monitorización, onde se pode visualizar gráficos da evolución sonora e escoitar os audios das máquinas averiadas. Ademais, os operarios poden etiquetar a alerta segundo os criterios predefinidos, contribuíndo ao adestramento continuo do modelo clasificador e optimizando a precisión da clasificación dos fallos.



Visualización da web, pódese reproducir un audio da alerta enviada e ver un gráfico evolutivo do son da máquina

## 2.2 Innovación aportada

A solución achega innovacións clave que melloran a eficiencia e adaptabilidade no mantemento industrial:

- **Eliminación de ruído estacional:** O sistema calibra o modelo semanalmente, diferenciando entre cambios debidos a factores ambientais (como choiva, tormentas ou factores externos) e anomalías reais, reducindo os falsos positivos.

- **Monitorización autónoma:** Funciona con conexión limitada a Internet. Isto permite a supervisión en contornos remotos ou rurais, garantindo unha detección eficiente sen interrupcións por problemas de conectividade.
- **Sistema adaptativo por máquina:** En lugar de reentrenar modelos desde cero, cada máquina realiza un proceso de fine-tuning individualizado, axustándose ao seu son específico, mellorando a detección sen sobrecarga computacional.
- **Predición temperá de futuras avarías:** Os modelos analizan patróns con datos históricos das máquinas para anticipar fallos, permitindo un mantemento preventivo máis eficiente.

## 2.3 Técnicas e algoritmos empregados

O sistema integra diversas técnicas e algoritmos orientados á detección temperá e clasificación de anomalías sonoras:

- ◆ **Preprocesamento de audio:** Realízanse tarefas de limpeza do son mediante normalización, eliminación de ruído ambiente e xeración de espectrogramas, que permiten representar visualmente as características acústicas do sinal.
- ◆ **Modelo *autoencoder* para detección de anomalías:** Empregamos un modelo de aprendizaxe non supervisada que aprende o comportamento acústico normal de cada máquina. Cando se detectan desviacións significativas na reconstrución dos espectrogramas, interprétanse como posibles anomalías.
- ◆ **Modelo clasificador de anomalías:** Un segundo modelo, de tipo supervisado, permite identificar o tipo de avaría detectada, baseándose en exemplos previamente etiquetados. Este modelo evoluciona co tempo a medida que se recollen e clasifican máis casos.
- ◆ **Broker de mensaxería (MQTT):** Utilízase Mosquitto, despregado en contedor Docker, como sistema lixeiro e eficiente de comunicación entre dispositivos e aplicacións. Permite a transmisión asincrónica e en tempo real de alertas e rexistros.

## 2.4 Tecnoloxías aplicadas

O sistema emprega unha combinación de tecnoloxías accesibles e eficientes, tanto no plano do hardware como do software, para garantir a funcionalidade en contornos con recursos limitados:

- ♦ **Captación e procesamento local:** Utilízase un sensor Adafruit I2S MEMS SPH0645LM4H conectado a unha Raspberry Pi 3 B+ con sistema operativo Linux, que permite a adquisición continua de sinais acústicos.
- ♦ **Conectividade:** A comunicación entre dispositivos e co servidor central realízase a través de redes Wi-Fi, Ethernet ou LTE, segundo a dispoñibilidade do entorno. A mensaxería entre módulos faise mediante o protocolo MQTT, xestionado cun *broker* Mosquitto despregado en contedor Docker.
- ♦ **Procesamento de audio e aprendizaxe automática:** A análise e o adestramento dos modelos realízanse localmente empregando Python e a biblioteca *librosa*, que permite a transformación de sinais acústicos en espectrogramas para a súa análise.
- ♦ **Interfaz de usuario e almacenamento:** O *dashboard* visual está desenvolvido en React.js, conectado cunha base de datos MySQL para almacenar e consultar alertas, rexistros e datos etiquetados polos técnicos.

### 3. Análise da viabilidade técnica

#### 3.1 Especificacións do hardware

Compoñente	Especificacións
Raspberry Pi 3 B+ (1GB RAM)	Miniordenador no que se executará o modelo de detección de anomalías.
Tarxeta SD (16 GB)	Para o almacenamento dos datos na Raspberry.
Sensor Adafruit I2S MEMS SPH0645LM4H	Sensor de son optimizado para captación de ruído en maquinaria industrial.
Caixa estanca IP66	Sistema de protección contra variacións de temperatura e humidade.

#### 3.2 Software e algoritmos

No sistema CuruxIA combinamos técnicas de aprendizaxe non supervisado e aprendizaxe supervisado para mellorar a detección e clasificación de avarías en máquinas industriais a partir de sinais acústicos.

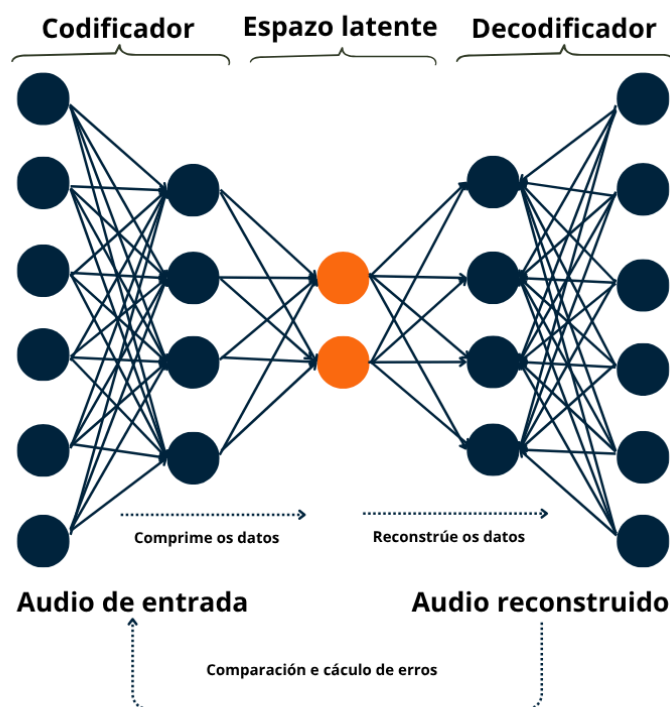
##### Autoencoder - non supervisado

Empregamos un autoencoder para a análise e monitorización de sinais acústicas. Aproveitando técnicas de intelixencia artificial, especialmente redes neuronais de compresión e reconstrución, preténdese extraer características clave de audio, detectar anomalías e incluso poder predecilas.



Un autoencoder é unha rede neuronal que aprende a codificar datos de entrada nunha representación de menor dimensión (“espazo latente”) e logo reconstruílos o máis fielmente posible.

O importante é comprender que o autoencoder actúa como un filtro de ruído e compresión: se aprendeu ben as características das mostras sanas, calquera desviación producirá un maior erro de reconstrucción, facilitando a detección de anomalías.



Representación do modelo autoencoder

## Fase 1. Entrenamento do Autoencoder

1. **Captura de Audio:** grábanse segmentos de 3 s desde unha entrada de micrófono durante 1 semana.

- 2. Preprocesamento:** conversión a mel-espectrograma de 128 bandas e 128 fotogramas.
- 3. Entrenamento do Autoencoder:**
  - División dos datos en conxuntos de adestramento e validación, para asegurar a súa correcta precisión.
  - Uso de ferramentas de mellora do entrenamento (como Early stopping ou Redución da taxa de aprendizaxe).
- 4. Conversión a TensorFlow Lite:** xeración dun modelo lixeiro e optimizado, listo para integrarse en hardware con recursos limitados.
- 5. Implementación de Líneas Base (“Baseline”):** gardado das sinais sanas orixinais para comparar futuras medicións e calcular o erro de reconstrucción.

## **Fase 2. Autoencoder en funcionamento**

Unha vez teñamos o modelo adestrado xa se pode proceder á detección de fallas en tempo real. Combina a saída do modelo xa creado coa extracción de características acústicas avanzadas e métodos estatísticos. Isto permitirá avaliar a probabilidade de anomalías e predecir o risco de fallo nunha máquina dunha maneira aínda máis precisa.

### **1. Captura de audio**

Grava fragmentos de audio duns segundos desde un micrófono conectado. Esta gravación reflíctese no son ambiente da máquina que se desexa monitorizar.

### **2. Redución de ruído**

Antes de analizar o audio, aplícase un proceso de redución de ruído (Spectral Gating) para eliminar sons de fondo que non son relevantes e poder centrarse únicamente no comportamento acústico da máquina.

### **3. Extracción de características**

O sinal limpo convértese nun *mel-espectrograma*, unha representación visual e cuantitativa da enerxía sonora en diferentes frecuencias ao longo do tempo.

### **4. Reconstrución co autoencoder**

O modelo *autoencoder*, convertido previamente a formato máis lixeiro (TFLite) para funcionar en dispositivos como Raspberry Pi, procesa o espectrograma de entrada e intenta reconstruílo. A diferenza entre o espectrograma orixinal e o reconstruído indica que tan "normal" ou "anómalo" é o son.

### **5. Cálculo do score de anomalía**

A diferenza entre a entrada e a saída do autoencoder convértese nun *score* de anomalía comprendido entre 0 e 1. Canto máis alto é este valor, máis probable é que o son represente unha anomalía.

### **6. Decisión e alerta**

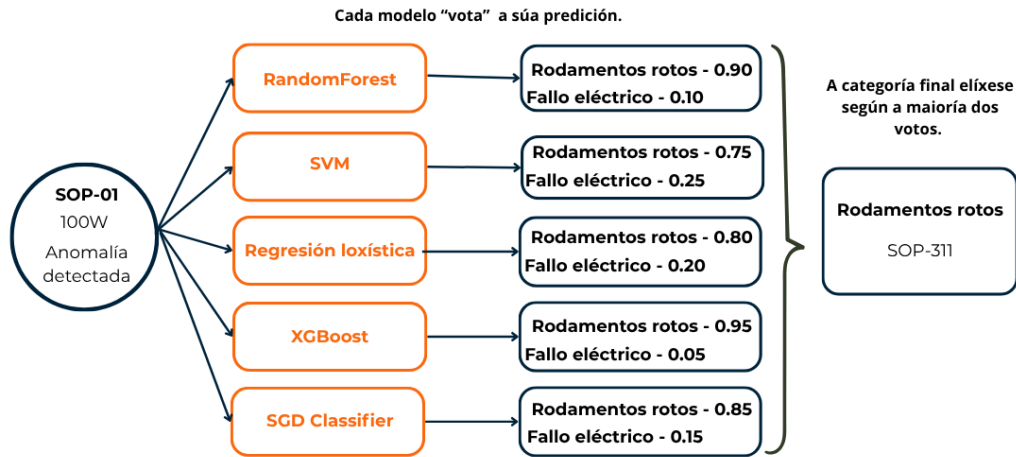
Se o *score* supera un limiar predefinido (por exemplo, 0.5), considérase que existe unha anomalía. Neste caso, lánzase unha alerta.

Este enfoque combina técnicas de procesado de sinal, aprendizaxe automática e monitorización continua para detectar problemas de funcionamento nas máquinas a través da análise do seu son en tempo real. Está deseñado para ser robusto, eficiente e facilmente desplegable en contornas industriais.

## **Modelo clasificador - aprendizaxe supervisado**

Unha vez identificada a presenza dunha anomalía, utilizamos un modelo de clasificación supervisado para predicir o tipo específico de avaría.

Este modelo está baseado nun clasificador de votación (VotingClassifier), que combina varios clasificadores individuais (como Random Forest, SVM e Gradient Boosting) para tomar unha decisión consensuada. Esta estratexia permítenos: mellorar a precisión da predición, reducir a variabilidade e aumentar a robustez.



Representación do modelo de votación

O modelo foi adestrado sobre un conxunto etiquetado de rexistros acústicos que representan diferentes tipos de fallos (p.ex. fallo de fase, rodamentos danados, sobrequecemento, etc.). A entrada do modelo consiste nun vector de características acústicas (extraídas mediante MFCCs, coeficientes cepstrais en escala Mel), e a saída é unha etiqueta que describe a clase de avaría predita, acompañada dun valor de confianza cando é posible.

Os modelos de clasificación de CuruxIA están deseñados para evolucionar e gañar precisión de forma progresiva. Cada vez que se detecta unha anomalía acústica e un profesional confirma manualmente que se trata dun fallo real (indicando tamén o tipo específico de avaría), ese novo rexistro incorpórase ao conxunto de adestramento.

Máquina	Fecha/Hora	Ubicación	Avería	Estado	Acción
SOP001 Soplante	26/5/2025 10:46	Dodro	Sobrecalentamiento ▾	Arreglada ▾	Guardar

Sacada da interface web, onde se validan as averías

Deste xeito, o sistema realiza un reentrenamento periódico cos novos exemplos validados, o que permite incrementar a capacidade do modelo para distinguir entre distintos tipos de avarías, adaptarse a novos escenarios operativos ou tipos de máquinas e reducir falsos positivos ou predicións incorrectas en situacións reais.

Así, canto maior sexa o número de audios etiquetados dispoñibles, máis afinado e fiable será o sistema de clasificación. Este enfoque de aprendizaxe continua, alimentado pola supervisión humana, asegura que CuruxIA se volva máis intelixente e eficaz co paso do tempo.

### 3.3 Estrutura da conectividade

O sistema está preparado para adaptarse a distintos niveis de conectividade:

- ♦ **Wi-Fi:** O método principal de transmisión, permite enviar datos en tempo real cando hai rede dispoñible.
- ♦ **Ethernet:** Alternativa en contornos sen Wi-Fi, cunha conexión por cable que garante estabilidade e continuidade do servizo.
- ♦ **LTE / 4G:** Solución de respaldo para zonas sen rede local, mediante módem USB e tarxeta SIM. A sincronización realízase de forma periódica ou baixo demanda.

Esta estrutura escalable asegura o funcionamento do sistema incluso en contornos rurais sen conectividade continua.

## 4. Análise da viabilidade económica

### 4.1 Orzamento e custos unitarios

Compoñente	Prezo estimado por máquina	Prezo estimado para 10 máquinas
Raspberry Pi 3	49,97€	499,70€
Sensor I2S MEMS	8,83€	88,30€
Tarxeta SD (16 GB)	6,11€	61,10€
Caixa estanca IP66	8,65€	86,50€
Cables e accesorios	5,00€	50,00€
<b>TOTAL</b>	<b>78,56€</b>	<b>785,60€</b>

\* Podería ser reducible con descontos por compras ao por maior

♦ **Total estimado por máquina: 78,56€**      ♦ **Para 10 máquinas: 785,60 €**

A solución propón o uso de compoñentes de baixo custo, amplamente dispoñibles no mercado como a Raspberry Pi 3, sensores Adafruit I2S MEMS, tarxetas SD, cableado estándar e unha caixa estanca. Isto permite deseñar un sistema funcional e duradeiro sen asumir gastos elevados.

Ao non depender de licencias nin subscricións, elimínanse os gastos recorrentes. A análise dos datos realízase localmente no propio dispositivo, evitando custos asociados a servidores na nube, transmisión continua ou almacenamento externo. Ademais de garantir a viabilidade incluso en zonas con pouca conectividade.

Dado o seu deseño CuruxIA é un dispositivo duradeiro que non require mantemento regular, reducindo así os custos operativos ao longo do tempo.

## **4.2 Comparación con outras solucións comerciais**

Existen solucións comerciais para o mantemento predictivo baseadas en sensores industriais e plataformas na nube, pero normalmente supoñen custos iniciais elevados e suscripcións recorrentes.

CuruxIA presenta unha solución autónoma e local, sen custos recorrentes, o que supón unha vantaxe especialmente relevante tanto para empresas con orzamentos axustados como para empresas na contorna rural onde a conectividade é limitada.

## **4.3 Estratexias para a optimización de custos**

A proposta está deseñada para minimizar os custos operativos ao longo do tempo, mesmo en contextos de uso prolongado ou implantación a gran escala. Un dos principais factores que contribúe a esta optimización é o uso da Raspberry Pi como plataforma de procesamento local. Este compoñente permítenos prescindir dos servizos na nube para o almacenamento e análise de datos, desta forma elimínase a necesidade de subscripción de plataformas externas.

Os modelos execútanse de forma puntual, sen reentrenamento continuo, aforrando recursos.

## **4.4 Escalabilidade e modularidade**

Cada unidade funciona de forma independente, permitindo a incorporación progresiva a outras máquinas de forma sinxela e económica. O baixo custo do dispositivo fai que sexa accesible tanto para pequenas como grandes empresas, adaptándose ás necesidades de diferentes sectores industriais sen ter que facer inversións significativas. Esta flexibilidade, xunto coa súa capacidade de adaptación case sen modificacións, facilita a súa implementación en diferentes tipos de corporacións, ampliando o así o seu potencial de mercado.

## 4.5 Análise DAFO



## 5. Valoración do impacto no ámbito rural

CuruxIA resolve necesidades de mantemento en contornos rurais, con pouco persoal, contribuíndo ao correcto funcionamento do abastecemento de auga.

### 5.1 Disminución de desprazamentos e emisións

A solución permite supervisar remotamente o estado acústico da maquinaria, o que reduce significativamente a necesidade de desprazamentos do persoal de mantemento. Isto axuda a unha planificación máis eficiente e reduce o consumo de combustible e as emisións contaminantes nos desprazamentos.



Ademais, sempre que sexa viable, priorizarase a adquisición local de compoñentes auxiliares como caixas estancas, tarxetas de memoria ou cableado. Aínda que algúns elementos principais son de fabricación internacional, esta medida busca reducir o transporte innecesario e apoiar a economía de proximidade.

## **5.2 Adaptabilidade a zonas con pouca conectividade**

A solución esta deseñada para traballar en contornos rurais illados, onde a conectividade pode ser limitada. Grazas á súa arquitectura modular, pode operar con conexión Wi-Fi, Ethernet e redes LTE.

## **5.3 Prolongación da vida útil das máquinas**

A capacidade de detectar averías antes de que se convertan en graves permite realizar un mantemento preventivo de forma máis eficiente, reducindo o desgaste innecesario dos equipos.

Isto prolonga a vida útil da maquinaria, minimiza os custos derivados de avarías graves e evita as paradas non programadas. O que resulta especialmente importante en instalacións esenciais como os sistemas de subministración de auga.

## **5.4 Potencial de expansión en industrias rurais**

A solución proposta é altamente escalable e adaptable a outras industrias con presenza no medio rural. Podendo ser aplicada para a maquinaria doutros sectores como industria agroalimentaria, forestal ou mesmo a eólica.

## 5.5 Durabilidade e redución de residuos

O dispositivo foi deseñado para ter unha vida útil de sete anos, grazas ao uso de compoñentes electrónicos de calidade e unha carcasa estanca IP66 que o protexe de condicións ambientais adversas. Os compoñentes poden ser substituíbles individualmente, o que facilita a reparación sen necesidade de renovar o sistema completo.

Ao final da súa vida útil, os compoñentes serán entregados a xestores autorizados segundo a normativa vixente, garantindo unha xestión ambientalmente responsable.

## 6. Conclusión e próximos pasos

CuruxIA nace como unha solución pensada para o rural: accesible, eficaz e preparada para traballar en contornas onde a conectividade e os recursos poden ser limitados. A través da análise acústica e o uso de técnicas de intelixencia artificial, permite detectar problemas en maquinaria antes de que se convertan en avarías graves, axudando a planificar mellor o mantemento e a prolongar a vida útil dos equipos.

O seu deseño modular, o baixo custo e a posibilidade de operar de forma autónoma fan que sexa fácil de implantar, mesmo a pequena escala. Ademais, combina o mellor da tecnoloxía (aprendizaxe automática, visualización de datos, detección automática) cun enfoque práctico pensado para o día a día dos técnicos.

De cara ao futuro, propóñense varias liñas de mellora e evolución:

- **Probas en instalacións reais:** Realizar probas piloto en instalacións reais para avaliar o rendemento do sistema en condicións operativas.
- **Mellora da predición e clasificación:** Optimizar os modelos de análise acústica, incorporando variables como a potencia da maquinaria para afinar a detección de anomalías.

- **Integración con outros sensores:** Estudar a incorporación doutros tipos de sensores (vibración, temperatura) que poidan complementar a análise acústica.
- **Expansión sectorial:** Adaptar a solución a outros ámbitos do rural como o agroalimentario, forestal ou enerxías renovables.
- **Avisos intelixentes:** Desenvolver alertas máis completas que inclúan posibles causas, pezas afectadas e suxestións de reparación.
- **App ou integración con ERP:** A partir do prototipo web existente, crear unha aplicación móbil para o uso dos técnicos ou a integración co ERP da empresa, facilitando a trazabilidade e xestión de incidencias desde unha plataforma unificada.
- **Sistema offline con sincronización automática:** Garantir que o dispositivo garde localmente as alertas en caso de desconexión, enviándoas automaticamente ao recuperar a conexión.

En resumo, CuruxIA ten potencial para mellorar o mantemento industrial no rural, reducindo tempos, custos e imprevistos. Agora, o seguinte paso é levalo da teoría á práctica.