



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Instrumentación en una máquina  
de estampado para la detección de  
movimiento y anomalías utilizando  
una unidad de medición inercial**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

Omar Noriega Camacho

**ASESOR(A) DE INFORME**

M.I. Daniel Martínez Gutiérrez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Instrumentación en una máquina  
de estampado para la detección de  
movimiento y anomalías utilizando  
una unidad de medición inercial**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**FI-DIE**



*Sello digital por  
emergencia sanitaria*

**PRESENTA**

Omar Noriega Camacho

Lic. Angélica Gutiérrez Vázquez  
Coordinación de Titulación y  
Servicio Social

angelica\_6@comunidad.unam.mx  
24/08/2021

**ASESOR DE INFORME**

M.I. Daniel Martínez Gutiérrez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

# Índice general

Índice general	I
Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	3
2.2. Objetivos particulares . . . . .	3
<b>3. Descripción de la empresa</b>	<b>4</b>
3.1. La empresa . . . . .	4
3.2. Descripción del puesto de trabajo . . . . .	5
<b>4. Marco teórico</b>	<b>6</b>
4.1. Industria 4.0 . . . . .	6
4.2. Instrumentación . . . . .	7
4.2.1. Unidad de Medición Inercial . . . . .	7
4.2.1.1. Acelerómetro . . . . .	8
4.2.2. Interfaz de comunicación . . . . .	10
4.3. Planificación Avanzada de la Calidad del Producto, APQP . . . . .	10
4.3.1. Etapas de APQP . . . . .	11
<b>5. Antecedentes</b>	<b>13</b>
5.1. Estado del arte . . . . .	13
5.2. Antecedentes del proyecto . . . . .	14
5.3. Conteo de golpes por minuto . . . . .	16
5.4. Certificación del <i>hardware</i> producido por la empresa . . . . .	16
5.5. Detección de anomalías . . . . .	17
<b>6. Definición de la participación profesional</b>	<b>18</b>
6.1. Diseño del dispositivo . . . . .	18
6.2. Instrumentación . . . . .	20
6.2.1. Acelerómetro . . . . .	22
6.2.2. Giroscopio . . . . .	24
6.3. Evaluación y periodo de pruebas . . . . .	25
6.4. Desarrollo de algoritmos . . . . .	29
6.4.1. Algoritmo de conteo . . . . .	31
<b>7. Metodología utilizada</b>	<b>33</b>

<b>8. Resultados</b>	<b>37</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>

---

# Índice de figuras

4.1. Estructura de un acelerómetro capacitivo . . . . .	8
4.2. Diagrama de bloques del sensor MPU-9250 . . . . .	9
5.1. Máquina de troquelado . . . . .	15
6.1. Flujo de proceso del proyecto . . . . .	19
6.2. Diagrama de bloques del sensor MPU-9250 . . . . .	21
6.3. Gráfica de aceleración en el eje $x$ $5Hz$ . . . . .	23
6.4. Gráfica de aceleración en el eje $z$ $5Hz$ . . . . .	24
6.5. Gráfica de aceleración en el eje $y$ $5Hz$ . . . . .	25
6.6. Gráfica de aceleración en el eje $x$ $184Hz$ . . . . .	28
6.7. Gráfica de aceleración en el eje $y$ $184Hz$ . . . . .	29
6.8. Gráfica de aceleración en el eje $z$ $184Hz$ . . . . .	30
6.9. Espectro de potencia de la aceleración. Frecuencia fundamental . . . . .	31
6.10. Espectro de potencia de la aceleración . . . . .	32
6.11. Señal filtrada . . . . .	32

# Índice de tablas

6.1. Pruebas a realizar sobre el dispositivo para evaluar su funcionamiento y características de diseño. . . . .	26
7.1. Descripción de las actividades según la metodología APQP. . . . .	35

# Capítulo 1

## Introducción

UNO de los cambios más importantes en el sector industrial durante los últimos años, ha sido la necesidad imperante de migrar de la industria tradicional a un mundo interconectado, donde la información es requerida en tiempo real. Entendamos por industria tradicional aquella surgida durante la tercera revolución industrial. Se trata de la industria automatizada que carece de la conexión a la nube de sus estaciones de trabajo y la interconexión de las mismas.

La interconexión de dispositivos es de relevancia en las operaciones diarias de la industria y la capacidad de generar, procesar y analizar datos se ha vuelto una tarea de importancia. A todo en su conjunto lo llamamos Industria 4.0; es en este contexto donde surge la necesidad de adecuar una máquina tradicional al mundo interconectado del siglo XXI. Resulta inviable cambiar toda una línea de producción para actualizar a los nuevos requerimientos del sector, es necesaria una actualización paulatina en función del desgaste presentado; esto no implica que no deba actualizarse o buscar la optimización de sus procesos empleando las nuevas tecnologías.

Una máquina con movimiento de carrera vertical utilizada para hacer estampado, troquelado, sellado, entre otros tipos de procesos; realiza un movimiento que requiere precisión al final del recorrido. Este movimiento produce desgaste en el mecanismo y en consecuencia se afecta la precisión del golpe, dañando la forma de la impresión, produciendo daños en la pieza manufacturada, disminuyendo así su calidad. Por otra parte, debe considerarse el tiempo muerto en producción debido al mantenimiento correctivo de la máquina. Esto podría optimizarse si se realizara una supervisión de su estado actual y su funcionamiento en tiempo real, anticipando el mantenimiento del carnero o bien, el cambio del troquel.

La troquelación es un proceso mecánico que se utiliza para dar forma o perforar en diferentes materiales: metal, plástico, cartón, entre otros. Este es el proceso de estudio, en el caso de uso tendremos una troqueladora y una de las partes de la cual nos interesa conocer su desgaste es el troquel. Además, a partir de la supervisión del troquel, es posible obtener información sobre la cantidad de piezas producidas de determinado número de parte.

En este proyecto se presenta una propuesta para supervisar una máquina con carrera vertical emplean-



---

do un sistema de instrumentación no invasivo, el cual puede instalarse en diferentes modelos de máquinas. El sistema propuesto puede transmitir información del funcionamiento en tiempo real mediante el protocolo de comunicación HTTPS<sup>1</sup> y los datos son visualizados a través de una interfaz gráfica en un dispositivo con conexión a Internet.

La metodología utilizada en el desarrollo del proyecto fue Planeación Avanzada de la Calidad de un Producto APQP, por sus siglas en inglés *Advanced Product Quality Planning*, la cual consiste en una metodología estructurada para el desarrollo de productos o servicios, garantizando que cada etapa del proyecto ha sido probada y es funcional, por lo cual al detectar un fallo, éste ha de ser corregido y probado; así la fase actual y la anterior ya son correctas. Esta característica nos permite resolver los problemas presentados, evitando llegar a un punto donde corregir fallas implicaría rediseñar el proyecto. Se eligió dicha metodología porque nos ofrece un diseño del producto conforme a los lineamientos de la empresa y un desarrollo óptimo en tiempos de desarrollo.

En este documento, abordaré cuales fueron los requerimientos establecidos para el desarrollo del proyecto, continuando con el planteamiento teórico del mismo para explicar el desarrollo y arquitectura de la solución, además abordaré los conceptos generales necesarios para la comprensión de la solución y que fueron de suma importancia en el proyecto. Finalmente mostraré los resultados del proyecto y las conclusiones sobre el presente.

---

<sup>1</sup>HTTPS protocolo de Transferencia de Hiper-Texto

---

## Capítulo 2

# Objetivos y alcance del proyecto

### 2.1. Objetivo general

Supervisar el desplazamiento del troquel de una máquina de carrera vertical mediante un sistema de instrumentación no invasivo que permita conocer el número de golpes por minuto efectuados por la troqueladora, brindando información en tiempo real para ser consultada desde un dispositivo remoto con conexión a Internet.

### 2.2. Objetivos particulares

- Reemplazar el *hardware* prototipo por uno hecho a medida, considerando la preservación del funcionamiento del prototipo.
  - Seleccionar un sensor considerando que no debe afectar el movimiento de la máquina, ni modificar su diseño, ni afectar la precisión del golpe para contar los ciclos completos de final de carrera efectuados por el troquel.
  - Seleccionar un procesador que cumpla con los requerimientos mínimos necesarios para la lectura del sensor, el procesamiento y el envío de los datos.
- Certificar el sensor de la empresa para su uso comercial en México, demostrando su desempeño en un proyecto dentro del marco de Industria 4.0.
- Diseñar el algoritmo de procesamiento para convertir los datos del sensor a golpes por minuto del troquel.
- Implementar el envío de resultados de la medición empleando el protocolo de comunicación HTTPS a través de *Wi-Fi* y asegurar la integridad y seguridad de los datos durante la transmisión de la información y que esta pueda ser consultada por un usuario en tiempo real.

## Capítulo 3

# Descripción de la empresa

### 3.1. La empresa

Líder mundial en el sector automotriz, la empresa se caracteriza por estar a la vanguardia en el desarrollo de nuevas tecnologías, innovando y adaptándose al ecosistema actual desde sus orígenes. Ha marcado hitos en la historia de la ingeniería haciendo que un producto innovador en su momento, resultara una solución deseable a tal punto de convertirse en norma; de esta forma hay varios de los desarrollos del pasado que hoy en día son reglamentarios dentro de la industria, tanto automotriz como en otras áreas de aplicación.

En un mundo cambiante y dinámico es necesaria la capacidad de adaptación y transformación, eso ha llevado a la empresa a adaptarse mejor a las circunstancias de la época. Los productos desarrollados despiertan entusiasmo en las personas, esto se consigue innovando y proponiendo nuevos productos y nuevas formas de hacer negocio.

Los valores característicos de la empresa y la visión de la misma consisten en:

- **Enfoque en el futuro y los resultados.** Las acciones de la compañía están enfocadas en conseguir resultados asegurando un futuro y creando una base sólida en las iniciativas sociales de la empresa.
- **Responsabilidad y sustentabilidad.** La compañía actúa prudente y responsablemente siempre en beneficio de la sociedad y el ambiente.
- **Iniciativa y determinación.** Actúa con iniciativa y responsabilidad empresarial consiguiendo sus objetivos con determinación.
- **Apertura y confianza.** Comunicación de los asuntos importantes para la compañía de manera oportuna y abierta, manteniendo así una estrecha relación de confianza.

- **Justicia.** La empresa da un trato justo a sus colaboradores y sus socios, tomando a consideración la equidad como piedra angular.

La empresa dirige sus objetivos en línea con el espíritu de su fundador, asegurando su futuro, garantizando un desarrollo sólido y enfocando sus acciones a transformar el entorno, mejorando la calidad de vida y conservando los recursos naturales.

## 3.2. Descripción del puesto de trabajo

### Ingeniero en electrónica avanzada

El puesto de trabajo está enfocado al uso de los conocimientos del área de la ingeniería electrónica, dirigidos hacia su aplicación en el ambiente de Industria 4.0. Las actividades relacionadas con el proyecto fueron:

- Selección del *hardware*. Seguimiento con los proveedores para la selección adecuada del *hardware* del sistema de instrumentación.
- Revisión del *hardware* y pruebas de funcionamiento. Contacto con los proveedores para la identificación y solución de problemas de *hardware* y *firmware*<sup>1</sup>.
- Programación de la lectura del sensor y construcción de archivos para el procesamiento de los datos.
- Colaboración en el desarrollo del algoritmo que convierte los datos de aceleración en golpes por minuto.
- Documentación del proyecto.

---

<sup>1</sup>Soporte lógico inalterable. Establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo.

---

# Capítulo 4

## Marco teórico

### 4.1. Industria 4.0

Uno de los grandes hitos en la Historia reciente de la humanidad ha sido lo que llamamos revolución industrial; un evento que transforma el método tradicional de producción imperante en la época en la que ocurre. Así, pasamos de la producción artesanal a la producción en serie durante el siglo XVIII, en la que la introducción de equipos impulsados por agua y vapor jugaron un papel fundamental en la industria. El segundo gran cambio llega gracias a la aparición de la energía eléctrica en la segunda mitad del siglo XIX y surge la producción en masa. La electrónica y su amplio desarrollo en el siglo XX sentaron las bases para la tercera gran transformación de la industria, lo que nos trajo la producción automatizada; gracias a los avances en la electrónica y los sistemas informáticos. Finalmente, el periodo en el que nos encontramos, estamos viviendo la transición de una industria convencional, basada en la automatización, hacia una industria inteligente utilizando sistemas ciber-físicos. El avance reciente en la interconexión de dispositivos, estaciones de trabajo y herramientas, en gran medida, se debe a la aparición de Internet y su desarrollo; esto abrió las posibilidades de una industria personalizada e interconectada.

El término Industria 4.0 fue usado por primera vez en Alemania, en la Feria de Hannover en 2011 [23]. La idea introducida es enfatizar en la transformación que estaba iniciando en el mundo de la economía digital y la migración de los sistemas tradicionales a los sistemas inteligentes, todo esto implica una transformación de la industria, la sociedad y la tecnología; dirigiendo ahora nuestros esfuerzos a una interconectividad de máquinas y herramientas, tanto en la industria como en el hogar.

Los ejes esenciales de la Industria 4.0 son [13]:

- Los productos personalizados según las necesidades del cliente.
- Cadenas de producción versátiles que pueden adaptarse a un entorno cambiante.

- La interconexión de productos y la comunicación entre ellos.
- El cambio en la interacción hombre-máquina.
- Internet de las cosas.
- Aparición de nuevos modelos de negocios orientados a los servicios.
- La inteligencia artificial.

Uno de los grandes actores de la Industria 4.0 es la inteligencia artificial, y son los algoritmos inteligentes los que juegan un papel esencial en la optimización de tareas, la detección de fallas y el manejo autónomo de toda una línea de producción.

Esta transformación tecnológica ha traído consigo también retos en la ciberseguridad. La generación de grandes cantidades de datos se vuelve un blanco fácil para los ciberataques. Este desarrollo ha traído consigo un cambio en la sociedad misma, donde ha habido un giro de tendencia hacia la profundización de conocimientos de las nuevas tecnologías y una especialización continua en la era de la digitalización.

## 4.2. Instrumentación

La instrumentación jugó un papel fundamental en el desarrollo del proyecto, siendo de suma importancia el conocimiento del principio de funcionamiento de diferentes tipos de sensores que permitieran desarrollar un sistema de instrumentación capaz de resolver el problema presentado.

Un sistema de instrumentación consiste en la interconexión de diferentes instrumentos, por medio de un bus de comunicación con el propósito de convertir una variable física en una señal eléctrica, y el programa necesario para automatizar el proceso y garantizar la repetibilidad de las mediciones.

El sistema de instrumentación desarrollado en el proyecto está formado por una unidad de procesamiento. Es un microprocesador ARM el responsable del procesamiento de los datos y la lectura del sensor. La variable medida es la aceleración y la medición se realiza mediante una Unidad de Medición Inercial, en este caso formada por un microprocesador y el sensor MPU-9250, el cual tiene embebido un acelerómetro y un osciloscopio, en la figura 4.1 puede observarse el diagrama de bloques del sensor. En las siguientes secciones se detallan las características del sistema.

### 4.2.1. Unidad de Medición Inercial

Una unidad de medición inercial IMU, por sus siglas en inglés, *inertial measurement unit* es un sistema electrónico capaz de detectar la posición relativa de un objeto utilizando sensores de aceleración y giroscopio; pudiendo ser complementado con un magnetómetro y un sensor de presión barométrica. Las IMUs se caracterizan por sus grados de libertad, en función de los ejes que los sensores incluidos

---

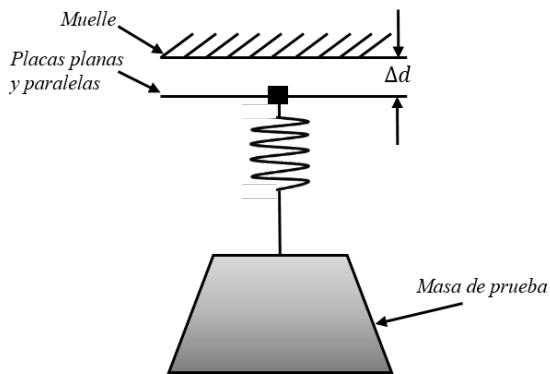


Figura 4.1: Diagrama de funcionamiento de un acelerómetro capacitivo. La masa sísmica o masa de prueba sujeta al resorte modifica la distancia entre las placas lo que cambia el valor de la capacitancia, produciendo variaciones diferenciales que son convertidas en cambios de aceleración.

de la gravedad podemos utilizar las «Fuerzas  $G$ » como unidad de medida. Existen diferentes tipos de acelerómetros, según su principio de funcionamiento, entre los más importantes tenemos:

- Acelerómetros capacitivos MEMS, Sistemas Micro-Electro-Mecánicos, por sus siglas en inglés, *Microelectromechanical systems*
- Acelerómetros resistivos MEMS
- Acelerómetros piezoeléctricos
- Acelerómetros piezorresistivos
- Acelerómetros de temperatura
- Acelerómetros de efecto Hall

pueden medir. Según la integración que se pueda realizar, o que sea de interés; es posible medir y reportar los cambios de velocidad, posición, orientación, aceleración y presión.

#### 4.2.1.1. Acelerómetro

Un acelerómetro, es un sensor de aceleración; convierte las perturbaciones mecánicas relativas al movimiento en señales eléctricas. La unidad de medida son los  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$  o bien en relación a la aceleración

Estas son las categorías en las que podemos englobar los acelerómetros, destacando que el principio general de todos ellos es una perturbación física que modifica una propiedad eléctrica la cual, mediante una caracterización, nos indica el cambio en la aceleración inducido por esa perturbación.

Un acelerómetro de efecto capacitivo mide las variaciones de la aceleración a partir de los diferenciales de distancia que percibe entre las placas en movimiento y la placa estática. En la figura 4.1 se puede observar una ejemplificación de la operación de un acelerómetro de efecto capacitivo.

El acelerómetro del MPU-9250 utiliza masas de prueba separadas para cada uno de los tres ejes. La aceleración a lo largo de un eje induce un desplazamiento de la masa sísmica correspondiente al eje, esto provoca un desplazamiento de las placas y los sensores capacitivos detectan el desplazamiento de forma diferencial. La estructura típica de estos acelerómetros es de peine, de forma que la estructura mecánica sea estable y con menor susceptibilidad al ruido por vibraciones, considerando además que se trata de una masa amortiguada.

Una característica de los acelerómetros capacitivos es la posibilidad de medir aceleración estática (DC) y aceleración dinámica (AC). Están limitados por el ancho de banda disponible, los cuales pueden ir desde los  $0[Hz]$  hasta algunas decenas de  $[kHz]$ , lo que los deja en desventaja frente a un piezoeléctrico. Una de sus características más apreciadas es su alta resistencia al ruido y la posibilidad de tener cables

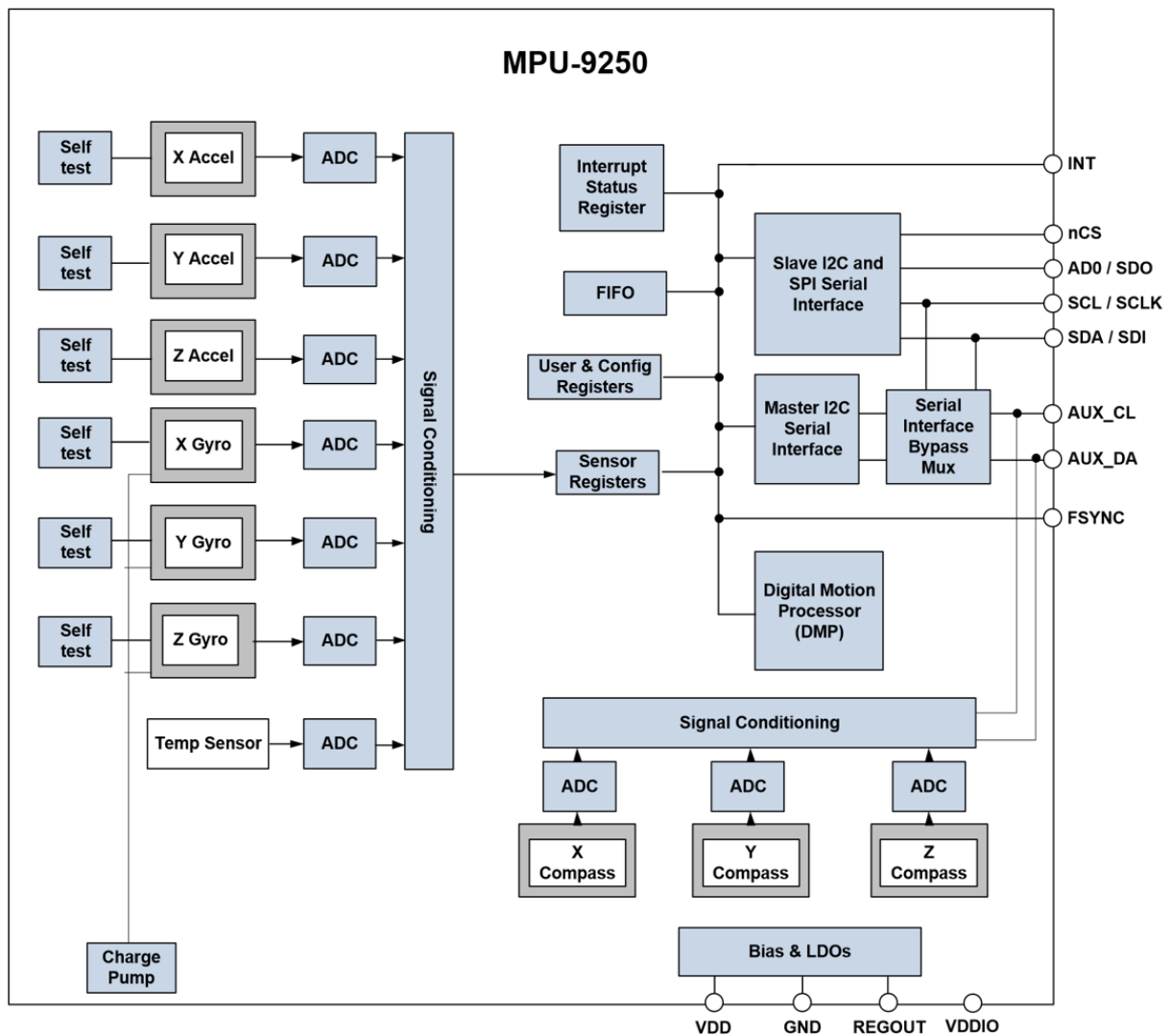


Figura 4.2: Diagrama de bloques del acelerómetro MPU-9250. Cada uno de los ejes tiene una masa de prueba y un convertidor analógico digital CAD, en este caso se trata de un convertidor  $\Sigma-\delta$ . Cada eje es independiente a los demás. Cuenta con un sensor de temperatura para realizar la compensación por temperatura necesaria[11].

de conexión más largos. En algunos casos es necesaria una compensación por la elevación de temperatura. Los acelerómetros capacitivos dominan el mercado automotriz, de telefonía móvil, entre otros; donde su ancho de banda les permite explotar sus características, pues las frecuencias de funcionamiento no revasan el orden de los  $[kHz]$ .

Previo a la etapa de acondicionamiento, es usual un convertidor analógico digital (CAD). Éste convertirá la señal de voltaje leída en una señal digital que podrá ser almacenada en los registros, en el caso de un acelerómetro con una interfaz diferente a la analógica.



### 4.2.2. Interfaz de comunicación

La interfaz de comunicación de un sensor es uno de los puntos importantes a considerar. En el caso de los acelerómetros existen tres grandes categorías en lo que se refiere a la interfaz de comunicación:

- Analógica. La salida de aceleración es una señal de voltaje o corriente, proporcional al cambio de aceleración. Generalmente suele estar entre VCC y la mitad de la caída de tensión en el caso de voltaje y del orden de los *miliampers* en el caso de los de corriente.
- I<sup>2</sup>C<sup>1</sup> y SPI<sup>2</sup>. En el caso de una señal digital la salida de aceleración suelen ser una serie de bits leídos en uno de los registros de memoria.
- PWM<sup>3</sup>. En los acelerómetros con salida modulada de ancho de pulso, sus salidas de onda cuadrada tienen un periodo conocido, pero un ciclo de trabajo que varía de acuerdo a la aceleración registrada.

Siendo los de interfaz analógica los más simples de implementar, pero los más susceptibles al ruido, mientras que los PWM requieren de un proceso más complejo para la obtención de los valores de aceleración.

## 4.3. Planificación Avanzada de la Calidad del Producto, APQP

La planificación avanzada de la calidad del producto es un conjunto de procesos y procedimientos empleados para asegurar la calidad de un producto, desde el desarrollo de la planeación en sí misma. La metodología surge en 1994 de la mano de fabricantes de automóviles estadounidenses: Chrysler, Ford Motor, y General Motors, con el propósito de estandarizar sus procesos de producción y establecer normas claras para el proceso de calidad del producto [12][10].

El método conlleva una gestión documental que permita el seguimiento por parte de todos los miembros del equipo, además debe ser posible identificar los fallos y modificaciones al diseño original. Actualización continua del estado del proyecto mediante una comunicación constante entre los miembros del equipo como con el cliente, es la característica más relevante de la metodología. El producto final debe cumplir todas las expectativas del cliente. Si bien esta metodología nace dentro de la industria automotriz, se ha hecho extensiva a demás áreas donde la calidad es un factor de interés para la empresa.

---

<sup>1</sup>Circuito inter-integrado, del inglés *Inter-IC (inter integrated circuits)*

<sup>2</sup>Interfaz de periféricos serie, SPI por sus siglas en inglés *Serial Peripheral Interface*

<sup>3</sup>Modulación por ancho de pulsos PWM, por sus siglas en inglés *pulse-width modulation*

---

### 4.3.1. Etapas de APQP

Las etapas de la metodología son:

- I. Planeación y definición del producto
- II. Diseño y desarrollo del producto
- III. Diseño y desarrollo del proceso
- IV. Validación del producto y del proceso
- V. Producción, satisfacción del cliente y mejora continua

En las siguientes secciones daré una descripción general de cada una de las etapas y más adelante en la tabla 7.1 podrán consultarse las actividades, conforme a la metodología, desarrolladas en el proyecto.

## Planeación y definición del producto

Una buena etapa de planeación nos puede asegurar, en la medida de lo posible, el éxito de un proyecto, la distribución equitativa de las tareas y la búsqueda clara de los objetivos establecidos. Esta es la primera tarea de APQP en la cual, es necesario recopilar todos los requerimientos del cliente y las restricciones tanto técnicas como legales del producto o servicio a desarrollar. Igualmente resulta necesario determinar el plan de negocios y la definición de objetivos.

De esta etapa podemos obtener un diagrama de Gantt con la definición de las tareas, los tiempos de duración de las etapas del proyecto y la duración del mismo. Adicionalmente, sería deseable la determinación de la ruta crítica en el diagrama y la identificación de los riesgos potenciales. En esta etapa es necesaria la participación de todos los miembros del equipo y del cliente.

## Diseño y desarrollo del producto

Después de definir las características del producto, es posible iniciar la etapa de diseño, es en esta fase donde observamos claramente las especificaciones de diseño resultando válido la mejora de los requerimientos mínimos dados por el cliente. La importancia de esta fase radica en que es la última antes de iniciar el proceso de manufactura.

## Diseño y desarrollo del proceso

Tomando como entrada las especificaciones de diseño generadas en la etapa anterior, aquí se iniciará el desarrollo del producto, es decir, se establecerán los procesos a seguir para la adecuada producción de un nuevo dispositivo, siempre conforme al diseño original. La fabricación de un dispositivo para

---

evaluación es la tarea fundamental de la etapa.

## **Validación del producto y del proceso**

Obtenida una serie de dispositivos muestra, éstos deberán ser evaluados, probados y sometidos a todas las variables que pudiesen ocurrir en un producto final, es decir esta etapa se centra en las tareas de evaluación de la calidad. Esto permite detectar un posible fallo que implique un cambio en el diseño o bien en la fabricación del producto.

Se debe de tener en cuenta que lo primero a evaluar son las características mínimas necesarias determinadas por el cliente; posterior a ello todas las características de funcionalidad del producto. El resultado de esta etapa es un producto listo para su producción en masa, que ya cumple con todo lo esperado y que no presenta ningún tipo de falla.

## **Producción, satisfacción del cliente y mejora continua**

Cuando llegamos a este punto, ya tenemos un dispositivo listo para producción, con la total satisfacción del cliente por lo que el proyecto puede ser cerrado en esta etapa y dar paso a la producción.

Los integrantes del proyecto deberán realizar una evaluación de todo el proceso, del producto y a partir de ello someterse a un proceso de mejora en tiempo, calidad y costos.

---

## Capítulo 5

# Antecedentes

La interconectividad del mundo actual ha modificado, en cierta manera, el comercio debido a la integración de nuevas tecnologías a la industria tradicional. Esto ha llevado a las empresas a dirigir sus esfuerzos a innovar en la solución a sus problemas tecnológicos.

### 5.1. Estado del arte

El uso de los acelerómetros tiene una amplia extensión, desde la telefonía móvil hasta la industria aeroespacial. Sus principales aplicaciones se centran en el análisis de vibraciones de los sistemas en los que son instalados. En [7] se analiza el comportamiento dinámico de un puente tras las afectaciones de un sismo. En el trabajo se realiza un análisis de la frecuencia fundamental del puente y el amortiguamiento utilizando una red de 24 acelerómetros distribuidos en la estructura. En [15] emplean múltiples acelerómetros y conociendo la distancia entre al menos dos de ellos y el diámetro de un objeto como la rueda de un vehículo se pueden calcular la distancia recorrida, el número de revoluciones y su velocidad angular. Es interesante el uso de un filtro paso banda para extraer los datos de orientación angular y con ello obtener el número de revoluciones.

En trabajos como [17] utilizan la medición de aceleraciones para determinar los impactos sufridos por jugadores de fútbol, para ello utilizan interruptores de fuerza que permiten medir la intensidad del impacto. Así, podemos ver que las aplicaciones se extienden en diferentes campos, incluyendo el área de la salud, en construcciones y una amplia variedad de proyectos.

No existe por tanto una aplicación como la propuesta en el equipo para contar golpes de estampado usando un acelerómetro, los trabajos más relacionados están enfocados a la medición de la fuerza de impacto, la velocidad, la distancia o algún parámetro de movimiento.

## 5.2. Antecedentes del proyecto

El troquelado de láminas para producir números de parte específicos en el ensamblaje de piezas de automóvil tiene una participación importante en la cadena de suministro. Para entender la necesidad del proyecto debemos identificar la participación del proveedor en el suministro de piezas.

En la planta de troquelación se manufacturan los lotes solicitados por la empresa, para ello el proveedor deberá de seguir los procesos más estrictos establecidos por su cliente en la producción de las mismas. El cliente determina cual es el troquel y la troqueladora que puede ser utilizada para manufacturar determinado número de parte. En la figura 5.1 se observa la troqueladora utilizada por el cliente en el proceso dentro de la cadena de suministro.

Resulta de especial interés la supervisión del estado del troquel, pues el cambio del mismo está a cargo de la empresa y no del fabricante. Es por ello que conocer el tiempo de vida y el estado de desgaste del mismo, nos permite anticipar su mantenimiento o su reemplazo.

El proveedor por su lado, le interesa conocer el número de parte producida y la cantidad que se produjo por turno, si bien se tiene un registro, éste se lleva por un método tradicional que incluso llega a ocasionar la pérdida de esta información. En el marco de Industria 4.0, el proveedor está interesado en conocer esa información de manera automática en tiempo real. Adicionalmente podemos ofrecer al proveedor información sobre los periodos de inactividad de la troqueladora, al realizar una supervisión constante podemos conocer el estado actual de la troqueladora y no solo del troquel, identificando la producción de piezas anómalas.

Las restricciones establecidas por el cliente para el desarrollo del proyecto son:

- El carnero de la máquina realiza un movimiento vertical.
  - No es posible modificar el diseño de la máquina.
  - El instrumento de medición a agregar no debe afectar el movimiento del troquel, ni alterar la fuerza con la que aplica el golpe al final de carrera.
  - Es necesario contabilizar el número de piezas por número de parte producidas en un minuto por la máquina.
  - No necesariamente existe una conexión de corriente eléctrica disponible cerca a la máquina.
-



Figura 5.1: Máquina de troquelado. 1) Elemento de la máquina que realiza el movimiento vertical (*carrero*). 2) Elemento responsable de moldear la lámina de acero (*troquel*). 3) Eje en el cual se realiza el movimiento. El proceso de troquelación es secuencial por lo que cada golpe produce una pieza. La troqueladora puede aplicar una fuerza desde su propio peso hasta de 600 [ton].

Además de los requerimientos planteados por el cliente, es necesario establecer directrices a seguir que permitan que el desarrollo del proyecto sea adaptable a diferentes máquinas que conserven un principio de operación similar a la de interés, aunque en procesos diferentes.

La necesidad del proyecto se da debido a la programación de mantenimiento correctivo en la máquina, puesto que cuando el ornamental ha sufrido desgaste por su funcionamiento normal, produce piezas defectuosas o de menor calidad siendo en este punto cuando se detecta que el troquel requiere de mantenimiento o ser reemplazado.

Detener una línea de producción para realizar mantenimiento correctivo representa pérdidas significativas, más aún si no se dispone en el momento de la pieza o la herramienta necesaria, incluso del personal adecuado para poder realizar el mantenimiento. Estas pérdidas podrían disminuirse si en lugar de ejecutar un mantenimiento correctivo, planeamos un mantenimiento preventivo, ahorrando tanto tiempo como material, evitando así la producción de piezas defectuosas por problemas de desgaste en el troquel.

Cabe mencionar, que reemplazar un troquel es un proceso que puede tomar más de unos meses. En este contexto surge como propuesta la medición del número de golpes por minuto dados por una máquina de carrera vertical así, mediante el análisis de un histórico, determinar el periodo recomendable para la realización del mantenimiento o cambio del troquel.

### 5.3. Conteo de golpes por minuto

La esencia del proyecto radica en la determinación del número de golpes y la vida útil de un troquel. El cliente no tiene forma de conocer el periodo de funcionamiento de un troquel, salvo por lo indicado por el fabricante. Además evaluando el proceso de producción, no existe retroalimentación sobre los periodos de funcionamiento de la máquina: los tiempos muertos, las piezas procesadas (que no necesariamente son el producto final), entre otros; poder conocer esta información nos permitiría realizar una optimización del mantenimiento, de la tarea que realiza el ornamental, y posiblemente, del proceso efectuado en la línea.

El proyecto está enfocado en las máquinas de carrera vertical. No es posible asumir un diseño único de las mismas o del espacio disponible entorno a ella; por tanto, al proponer una variable a medir debemos considerar que no dependerá de la distancia que recorra la máquina, de si existe un objeto o no al final de la carrera o de la fuerza que aplica el ornamental; asumirlo implicaría posibles adecuaciones necesarias al diseño cuando la interacción del ornamental y la máquina se vea modificada. Para abordar el problema es necesario identificar las posibles variables a medir que podrían aportarnos información sobre el funcionamiento de la máquina.

### 5.4. Certificación del *hardware* producido por la empresa

Uno de los intereses de la compañía, fue el certificar uno de sus sensores para su comercialización en México. Por tanto se decidió utilizar este sensor para resolver el problema del conteo de los golpes de la troqueladora. El sensor propuesto por la empresa es una IMU, que tiene capacidad de medir ocho variables mediante sensores embebidos en sí: acelerómetro, magnetómetro, giroscopio, de ruido, de humedad, presión, intensidad luminosa y temperatura [8].

La aplicación de este sensor implicaba utilizar alguna de las variables disponibles. El equipo tomó la decisión de elegir el acelerómetro, puesto que a partir de los cambios en aceleración, podríamos identificar y caracterizar el movimiento del troquel. Originalmente se tenía la intención de utilizar los demás sensores embebidos para tener una mayor fuente de datos, sin embargo se detectó que la configuración necesaria del acelerómetro inhabilitaba los demás sensores.

Para poder realizar un adecuado conteo de golpes era necesario que la frecuencia del acelerómetro fuera de  $2000[Hz]$ , en esta frecuencia los demás sensores embebidos en la IMU determinada por la empresa no pueden operar; es por ello que se decidió reemplazar este dispositivo, conservando el principio de funcionamiento para la medición: medir la aceleración del troquel. De esta forma, el algoritmo de conteo no se vio alterado.

---

## 5.5. Detección de anomalías

Una propuesta agregada, fue la posibilidad de realizar una detección de anomalías, obedeciendo a las características actuales de Industria 4.0, donde además de hacer una recolección y almacenamiento de datos en grandes cantidades, resulta oportuno utilizar la información en herramientas modernas, como lo es la inteligencia artificial (IA). Así, hace sentido el almacenamiento de grandes volúmenes de datos.

Esto implica un proceso de entrenamiento de un algoritmo por lo cual es necesario la recolección de datos de ensayo. Se debe desarrollar una matriz de pruebas en un ambiente controlado que permita introducir fallas al sistema, realizar una documentación de las mismas y finalmente implementar el entrenamiento del algoritmo. Si bien esta tarea centra sus requerimientos en el *software*, es de suma importancia contar con un sistema de instrumentación adecuado para la medición exacta, permitiendo la detección de anomalías.

---



## Capítulo 6

# Definición de la participación profesional

Como ingeniero eléctrico electrónico mi participación dentro del proyecto se ha centrado dentro del área técnica, donde he trabajado en dos aspectos claramente identificables: 1) En el desarrollo del *hardware ad hoc*, tanto en la instrumentación como en el procesamiento de los datos, esta tarea ha implicado un desarrollo de pruebas de funcionalidad, estrés y fatiga del dispositivo; 2) En el desarrollo de los algoritmos que procesan la información en el dispositivo para el funcionamiento del sensor.

### 6.1. Diseño del dispositivo

Es necesario saber que, por así convenir a sus intereses, la empresa no realizó el desarrollo de *hardware* del sensor ni del dispositivo de procesamiento. Existió la colaboración con un tercero quien, en función de los requerimientos planteados, llevó a cabo el diseño y desarrollo del *hardware*. Por tanto, mi participación en esta etapa se centró en determinar las características necesarias para un adecuado funcionamiento, la evaluación de las propuestas de desarrollo presentadas por las empresas participantes para la creación del *hardware*, así como en la evaluación del dispositivo entregado por el tercero.

Aplicando mis conocimientos sobre electrónica, evalué las propuestas de diferentes proveedores sobre sus diseños electrónicos, el *firmware* propuesto y el lenguaje de programación que sería necesario para la implementación de la solución, y las características económicas de cada una de las soluciones presentadas, tomando en consideración:

- Microprocesador a utilizar
- Memoria RAM
- Conectividad

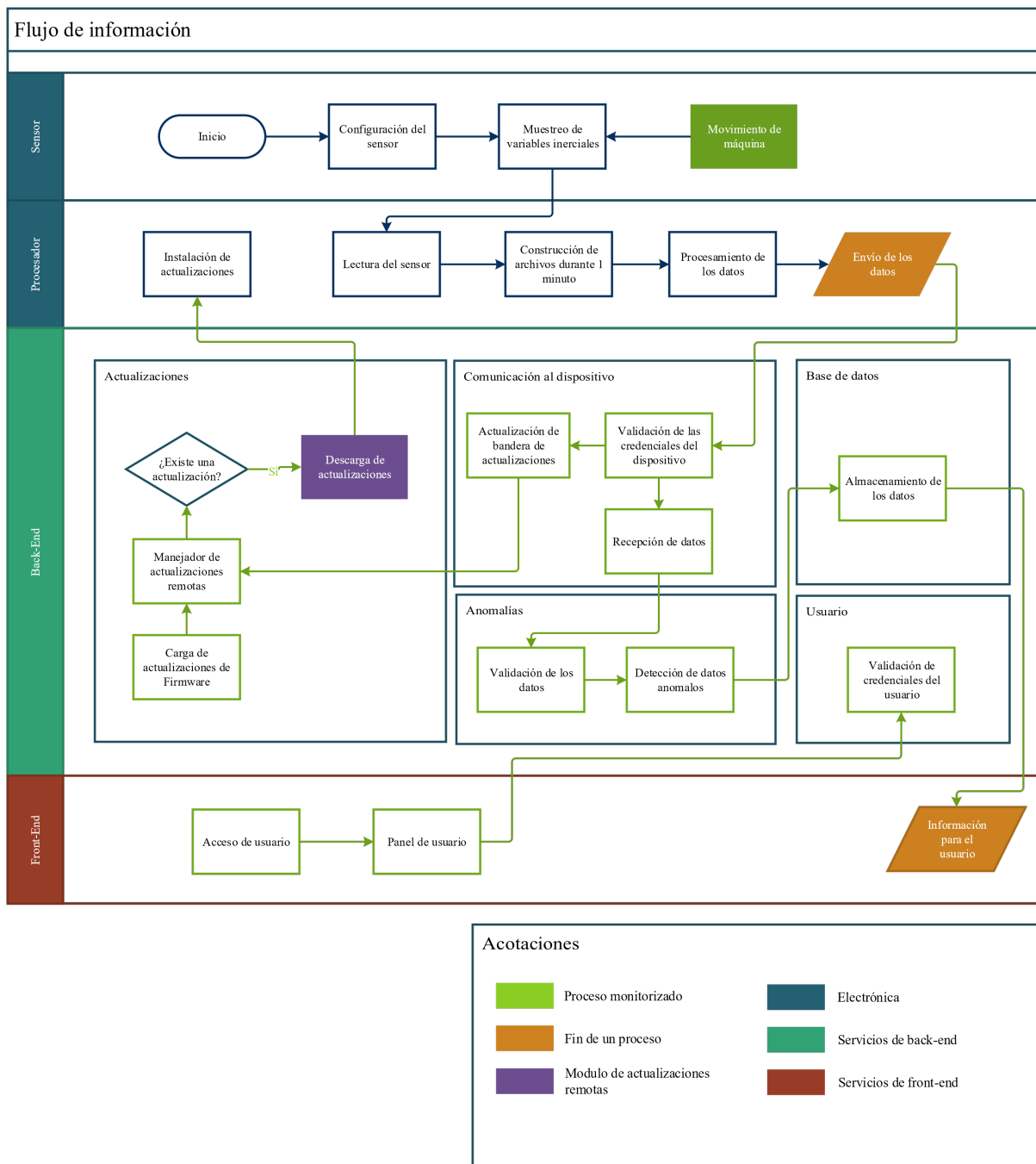


Figura 6.1: El proyecto tiene un flujo claro de los procesos desde la recolección de datos en el sensor hasta la consulta de los mismos en una interfaz web. El protocolo de comunicación manejado para la comunicación entre el dispositivo y el servidor es HTTPS.

- Puertos disponibles
- Sistema operativo
- Protocolos de comunicación disponibles

- Sensores propuestos para la IMU
- Alimentación

Por medio de una comparación de propuestas y obedeciendo a las necesidades y capacidad de procesamiento del *hardware* presentado y en colaboración con el resto del equipo, elegimos una de las opciones para llevar a cabo el desarrollo.

Una vez desarrollado el *hardware* fue necesaria su revisión y puesta a prueba. En la tabla 6.1 puede observarse el proceso de evaluación efectuado. Esta etapa implicó una serie de revisiones y adecuaciones tanto en *hardware* como en *software*. De forma colaborativa se resolvieron cada una de las incidencias presentadas. Superadas las pruebas de operación y funcionamiento, iniciamos el proceso de certificación.

Uno de los intereses es la comercialización del producto como un servicio en Norteamérica, por lo que una etapa importante es la certificación del *hardware* para su venta. Se tomó la decisión de certificarlo bajo los estándares de la norma oficial mexicana *NOM001* y la norma de telecomunicaciones *CFF*, para cubrir los estándares de calidad del producto y la radiación e interferencia respectivamente. De esta forma el *hardware* desarrollado cubriría los requisitos para su distribución en México y Estados Unidos.

## 6.2. Instrumentación

En el sistema de instrumentación se han de cumplir las restricciones establecidas por el cliente, por ello el sensor propuesto es un acelerómetro con el cual sea posible detectar, mediante los cambios en la aceleración sobre el eje  $z$ , el movimiento del ornamental. Además, esto permite adaptarnos a futuras interacciones con máquinas diferentes. Resulta necesario incluir más de un sensor y de ésta forma tener una IMU adaptable a futuros requerimientos. La IMU está compuesta por un acelerómetro y un giroscopio; además de un magnetómetro. Así nos será posible adaptar el algoritmo de cuenta en los casos donde medir la aceleración no sea suficiente para analizar el funcionamiento de determinada máquina. El protocolo de comunicación establecido para la IMU es comunicación UART <sup>1</sup>, esto permitirá extender el cable de conexión del sensor a una distancia mayor; permitiendo que la unidad de procesamiento pueda encontrarse en una posición cercana a la máquina de interés.

El sensor propuesto tienen una interfaz de comunicación diferente, por tanto es necesario un microprocesador que lea la información de cada uno de los sensores, adecue los datos en crudo y habilite un puerto serial, donde la unidad de procesamiento podrá leer la información agrupada en un formato definido. En la figura 4.2 podemos observar que el sensor propuesto tiene interfaz  $I^2C$  y SPI, si bien estos protocolos son de mayor fiabilidad para la transmisión de datos, tenemos riesgo de perder información en la transmisión por cables largos.

La velocidad de transmisión de datos debe permitirnos supervisar el comportamiento de la máquina,

---

<sup>1</sup>Son las siglas en inglés de *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, en español: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal

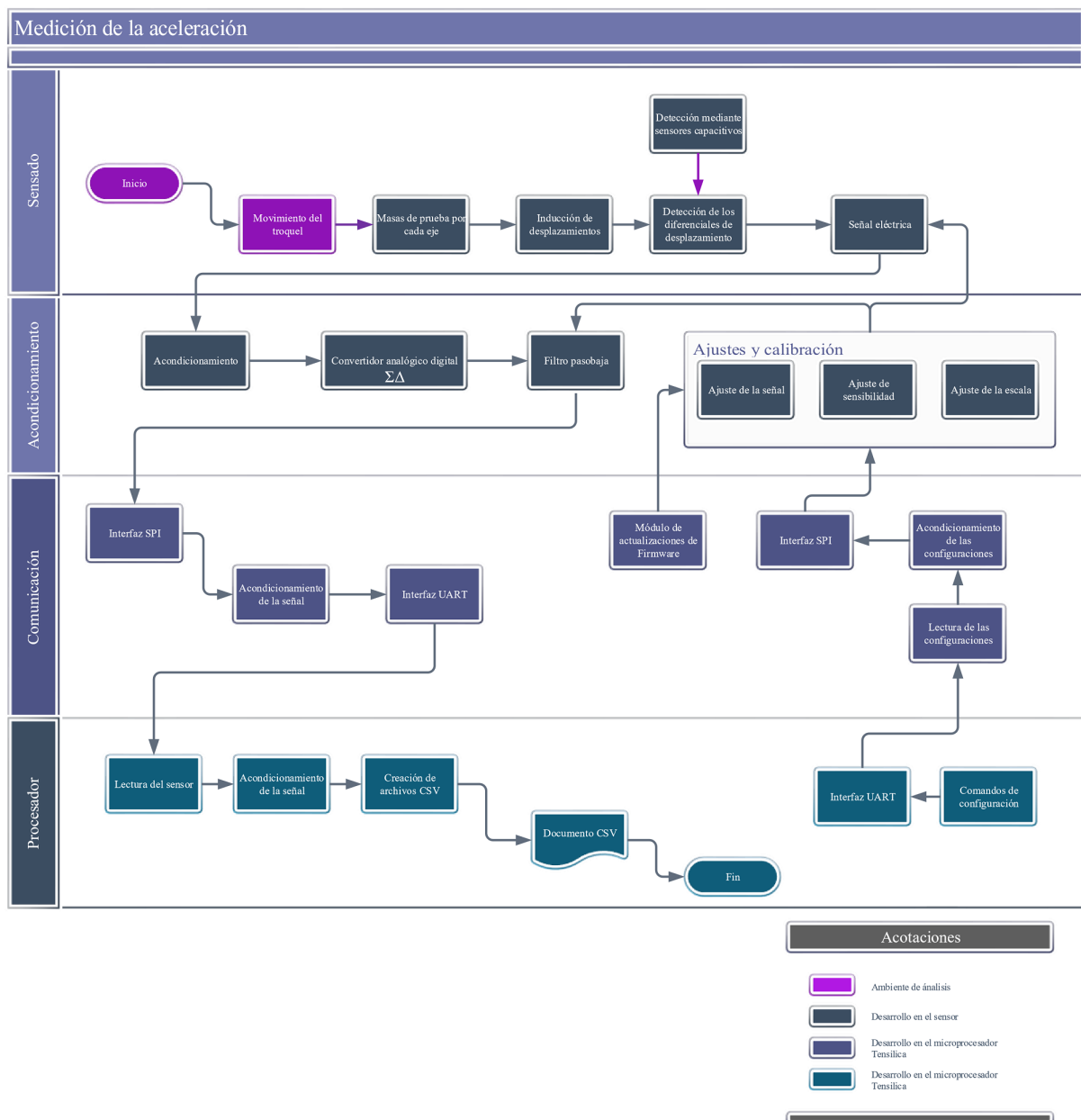


Figura 6.2: El proceso ilustrado en el diagrama muestra desde la detección de las vibraciones en el acelerómetro capacitivo hasta su procesamiento y almacenamiento en formato CSV. Es posible identificar cada una de las etapas, y como es la interacción a priori y posteriori. En el presente nos enfocaremos en la etapa de comunicación correspondiente al procesador.

aún cuando las máquinas en análisis tengan una velocidad de movimiento considerable. Para ello se estableció como requerimiento muestrear a diferentes frecuencias:

- 100[Hz]
- 200[Hz]

- 500[Hz]
- 1000[Hz]
- 2000[Hz]

En concordancia con el teorema de muestreo de Nyquist - Shannon, para recuperar adecuadamente una señal, la frecuencia de muestreo debiera ser cuando menos dos veces la frecuencia máxima. Observamos en la práctica que para recuperar el movimiento de la máquina necesitamos muestrear a 1[kHz] cuando mínimo, a pesar de que 100[Hz] ya cumplen con el criterio mencionado y lo excede, pues la máquina de estudio tiene una frecuencia fundamental de 0.48[Hz]. El aumento de la frecuencia de muestreo obedece al ruido introducido por el sensor y su saturación por el cambio de dirección en el movimiento. Los picos de lectura afectan considerablemente si no muestreamos a una frecuencia mayor.

En el desarrollo del proyecto, el equipo determinó muestrear a 2000[Hz]. En esta frecuencia permite contar los golpes con una precisión del 97% y asegurar que la información proporcionada sea correcta. En el algoritmo implementado se consideró un demuestreo para este caso, permitiendo optimizar la cantidad de datos procesados sin perder detalle de la señal.

De acuerdo con el fabricante del *hardware* se determinó como debía de ser la comunicación entre el sensor y la unidad de procesamiento. Se puede observar en el diagrama de la figura 6.2 cómo el microprocesador intermedio regula la comunicación entre el sensor y el procesador. En este microprocesador se realizan las siguientes tareas:

- Lectura del sensor mediante SPI.
- Escritura de las configuraciones deseadas en el sensor.
- Envío de los datos del sensor a la unidad de procesamiento.
- Lectura de los comandos de configuración de la unidad de procesamiento.
- Habilitación de un punto acceso para la actualización del *software* del sensor.

Las configuraciones del sensor, el ajuste de sensibilidad y la frecuencia de corte del filtro paso baja de los ejes del sensor y el módulo de actualizaciones se ejecutan en este microprocesador.

### 6.2.1. Acelerómetro

Medir la aceleración del ornamental de la máquina y en función de los cambios registrados calcular el número golpes que dio, hace que el sistema de instrumentación propuesto no sea invasivo ni afecte el proceso en sí.

---

Un factor de ajuste importante en los acelerómetros es el rango de medición, éste se mide en  $g^2$ , los rangos típicos pueden ir desde los  $0[g]$  hasta varias centenas de  $g$ . Es importante identificar las necesidades de la aplicación puesto que entre mayor es el rango de medición, menor será la resolución que habrá disponible, por lo que no resulta de utilidad contar con un acelerómetro de amplio rango para realizar mediciones de valores pequeños. En nuestro caso utilizaremos un acelerómetro ajustable entre 2, 4, 8 y 16 $[g]$  [11] con estos rangos podemos tener lecturas de hasta  $156 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  de esta forma puede ser configurado según las necesidades del proyecto.

Los rangos del acelerómetro permitieron leer adecuadamente el sensor. Ajustado a la menor escala observamos una saturación permanente, debido a que los valores máximos del rango de los 2 $[g]$  son los valores promedio de la señal, por ello ajustamos el rango del sensor al máximo valor posible, así la saturación solo está presente en el cambio de sentido del movimiento del troquel.

El ancho de banda del filtro va de los 5 $[Hz]$  hasta los 200 $[Hz]$ . La señal resultante del filtro del sensor,

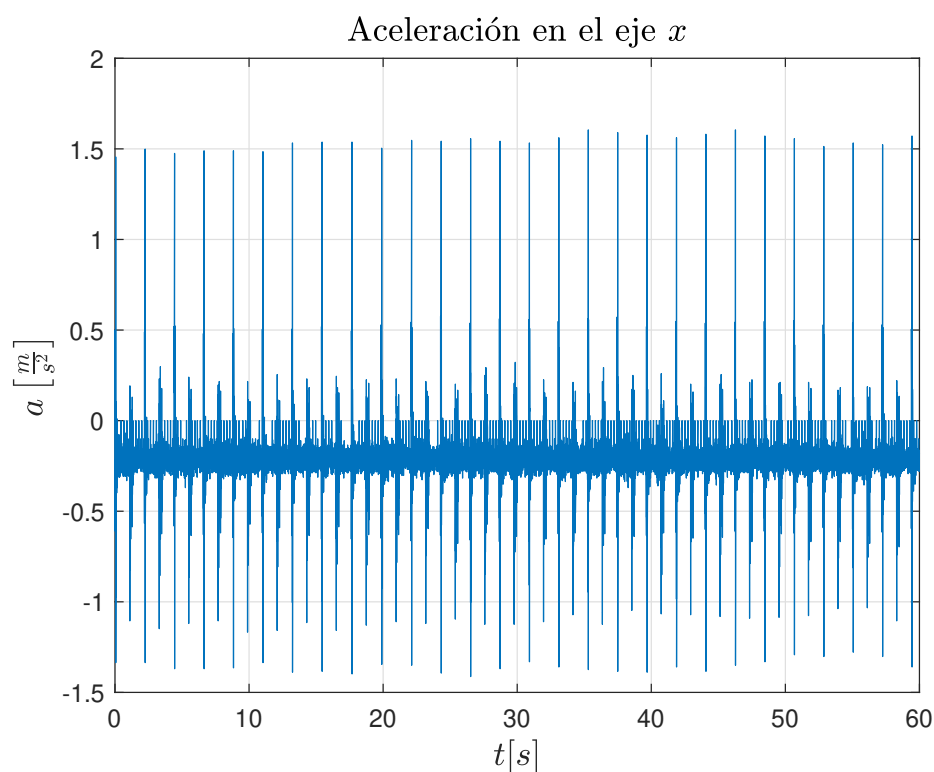


Figura 6.3: Aceleración en el eje  $x$ . Con el sensor configurado a 2000 $[Hz]$  observamos la señal del sensor con saturaciones en el cambio de sentido del movimiento. La recolección de datos se muestra durante un minuto.

observamos que en baja frecuencia, 5 $[Hz]$ , el ruido del eje  $y$  aumenta considerablemente comparado con los valores registrados a una frecuencia mayor como 184 $[Hz]$ . En las figuras 6.3, 6.5 y 6.4 observa-

<sup>2</sup>Un  $g$  equivale a  $9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  a nivel del mar en el Ecuador

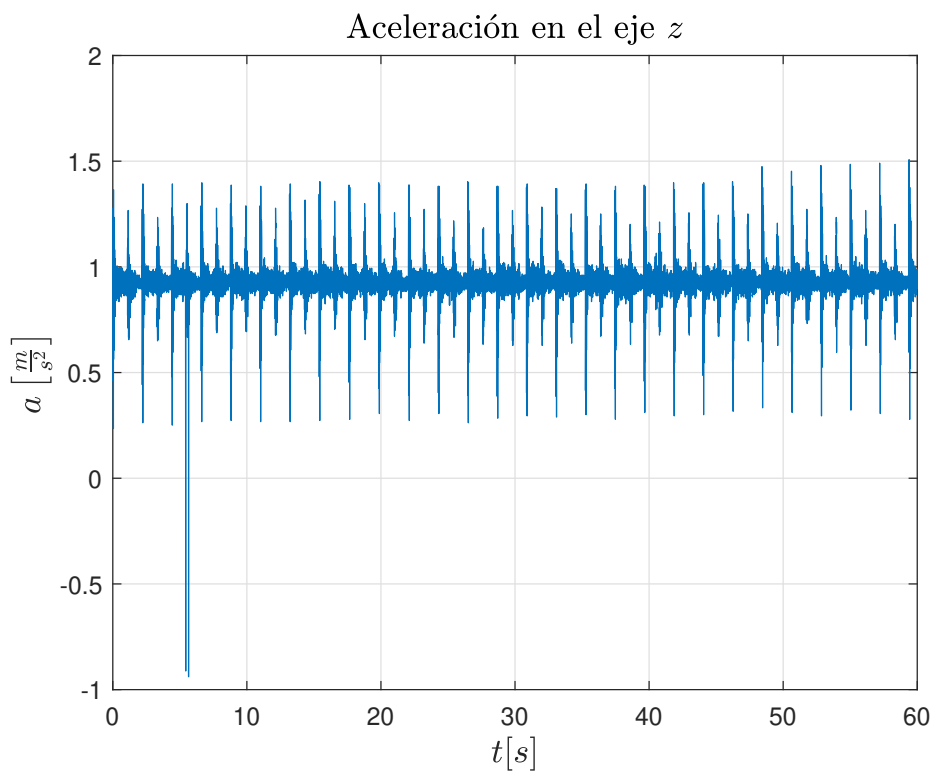


Figura 6.4: Aceleración en el eje  $z$ . Con el sensor configurado a  $2000[Hz]$  observamos la señal del sensor con saturaciones en el cambio de sentido del movimiento.

mos la señal de aceleración con una frecuencia de corte de  $5[Hz]$ . Cada pico de saturación representa un cambio de dirección.

Esta diferencia no afecta en el conteo de golpes, pero puede introducir ruido en el algoritmo.

### 6.2.2. Giroscopio

En una primera fase del proyecto el giroscopio no representa un elemento fundamental en el cálculo de golpes del ornamental, pero no implica que no será necesario, entendiéndose esto, el giroscopio deberá ofrecernos posibilidades de uso a diferentes velocidades de giro:

- $250 \begin{bmatrix} ^\circ \\ - \\ s \end{bmatrix}$
- $500 \begin{bmatrix} ^\circ \\ - \\ s \end{bmatrix}$
- $1000 \begin{bmatrix} ^\circ \\ - \\ s \end{bmatrix}$
- $2000 \begin{bmatrix} ^\circ \\ - \\ s \end{bmatrix}$

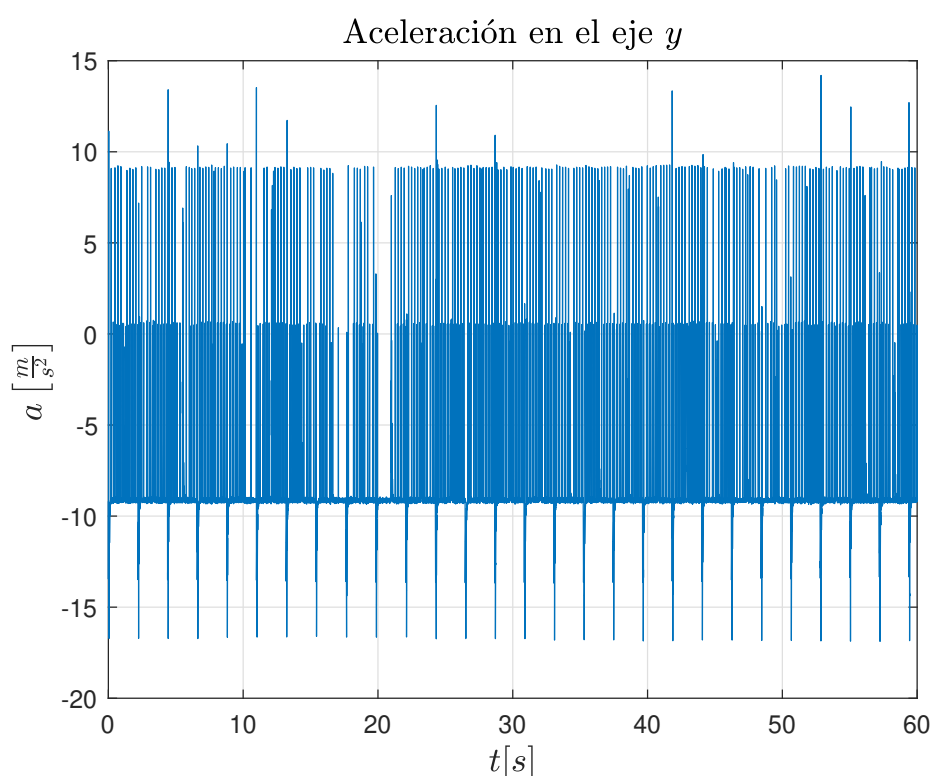


Figura 6.5: Aceleración en el eje  $y$ . Con el sensor configurado a  $2000[Hz]$  observamos la señal del sensor con saturaciones en el cambio de sentido del movimiento. Con el filtro paso baja con una frecuencia de corte a  $5[Hz]$  se observa una mayor cantidad de ruido en el eje  $y$ .

### 6.3. Evaluación y periodo de pruebas

Las pruebas sobre un producto nuevo deben ser extensivas; tal que puedan garantizar el adecuado funcionamiento de un dispositivo y detectar los posibles problemas de diseño para su corrección antes de un proceso de producción en grandes cantidades, para ello establecí una serie de pruebas a realizar en el dispositivo, que aseguraran su calidad y operación en condiciones normales.

Matriz de pruebas	
Prueba	Objetivo de la prueba
Arranque correcto del dispositivo	Validar que al energizar el dispositivo, éste funcione de acuerdo a lo esperado.
Conexión y desconexión del sensor	Verificar que al conectar el sensor y energizar el dispositivo, el sensor sea detectado, se envíe por el puerto la trama de configuración, iniciando la transmisión de datos.



Prueba	Objetivo de la prueba
Conexión a la red	El dispositivo deberá conectarse a internet, en caso de perder la conexión o que ésta desaparezca deberá intentar continuamente una reconexión sin interrumpir los demás procesos que esté ejecutando.
Procesamiento de los datos	Deberá procesar todos los datos recolectados del sensor, alistar un paquete para su envío por HTTPS, validar credenciales de conexión con el servidor y transmitir los datos. El procesamiento deberá ser constante e ininterrumpido independientemente del estado de la máquina supervisada.
Temperatura	Determinar el rango de temperaturas de funcionamiento del dispositivo, así como detectar posibles fallas por sobrecalentamiento.
Lectura del sensor	Identificar las características de funcionamiento del sensor, realizar un proceso de calibración y ajuste a cero en función de los valores leídos, así mismo es necesario validar los datos entregados por el sensor y el adecuado funcionamiento de las diferentes frecuencias de muestreo.

Tabla 6.1: Pruebas a realizar sobre el dispositivo para evaluar su funcionamiento y características de diseño.

Mi labor se concentró en la creación de la matriz de pruebas y la ejecución de las mismas. Se pueden observar las pruebas planteadas y su objetivo en la tabla 6.1. En constante diálogo con el equipo así como con los desarrolladores del *hardware*, en este proceso identifiqué diferentes problemas que permitieron mejorar el diseño original del dispositivo. Estos problemas se detallan a continuación:

## Temperatura

Uno de los principales problemas fue el sobrecalentamiento del dispositivo. Realicé pruebas extensivas a diferentes temperaturas y finalmente pruebas de estrés, sometiendo el dispositivo a temperaturas elevadas dentro del rango de funcionamiento en una planta, los resultados fueron que el dispositivo no era apto para operación a temperatura ambiente.

En un primer análisis fue detectado en la lectura del sensor un ciclo infinito que, aunque lo esperado era que el dispositivo estuviera en reposo, en realidad se estaba utilizando el total de la capacidad de procesamiento, por tanto una primera tarea consistió en la modificación del algoritmo de lectura del sensor para poner el servicio en un estado de reposo. Tras las modificaciones realizadas observamos

que el dispositivo operaba por un tiempo prolongado a temperatura ambiente, 20[C], pero al aumentar ligeramente la temperatura, el dispositivo se sobrecalentaba y la rutina de protección lo sometía a un apagado directo.

El resultado de la primera interacción con el dispositivo condujo a una devolución necesaria, para realizar las modificaciones que permitiesen un funcionamiento conforme a lo esperado. Cabe mencionar en este punto que el equipo de electrónica en la empresa no tiene a su disposición los esquemáticos para realizar modificaciones en el dispositivo entregado por el desarrollador del *hardware*.

Tras una revisión del dispositivo se modificó la imagen del sistema operativo que corre sobre el procesador. Los cambios realizados por *software* resolvieron el problema de la temperatura en el dispositivo, permitiéndonos evaluar el resto de sus características y someterlo a pruebas de estrés para validar una correcta operación.

Realicé el diseño y desarrollo de un *script* que pudiera consultar la temperatura del procesador, el porcentaje de uso del CPU, los procesos que ejecutaba, el tiempo en el que se había hecho la lectura y generara un archivo para almacenar los datos de operación. Con los datos recolectados, realicé un procesamiento de los mismos para evaluar cuáles eran los procesos que más CPU consumían y cómo se comportaba la temperatura del procesador durante la operación. El resultado fue una respuesta exponencial de la temperatura que llegaba a un valor permanente a los 85[C]. En las pruebas de estrés pudimos observar un adecuado funcionamiento del dispositivo a temperaturas estándar de operación en una planta.

La última etapa de pruebas de temperatura se centró en la operación del dispositivo y sensor trabajando en conjunto, de esto observamos que el sensor demandaba más recurso del esperado del dispositivo por lo que fue necesaria una segunda revisión. En conjunto con los desarrolladores del *hardware*, encontramos que, disminuir la frecuencia de operación del dispositivo sin llegar a afectar su funcionamiento, así como suspender parte de los núcleos del procesador, mejoraba la temperatura y mantenía un funcionamiento estable. Dados los resultados, realicé un *script* que automatizara las configuraciones necesarias durante el arranque del dispositivo.

Con ello cerramos la etapa de evaluación de operación y continuaron las pruebas de funcionamiento. En esta etapa, el sensor y el dispositivo fueron colocados en un simulador para evaluar su correcto desempeño. En el *hardware* de prototipo teníamos una precisión del 97% por lo que buscamos que ésta se repitiera en el *hardware* final.

Gracias los cambios realizados en la carcasa y la incorporación de un disipador, la temperatura se redujo a 45[C] en la versión de producción.

## Sensor

Las pruebas de funcionamiento del sensor las ejecuté evaluando primeramente los requerimientos planteados como mínimos necesarios al desarrollador del *hardware*. Para realizarlo implementé un código

---

que permitiese leer el puerto serial del sensor y almacenar los datos leídos en un archivo, para su posterior análisis. En la figura 6.2 puede observarse las tareas efectuadas en el procesador para la comunicación y lectura de los datos del sensor.

Empleando el código generado realicé una primera caracterización del sensor, identificando la trama de envío de datos, al detectar que ésta resultaba compleja para lo estipulado, y tras evaluar las diferentes frecuencias de muestreo, detecté que no transmitía la cantidad de datos esperados; por tanto fue necesaria una revisión de parte del desarrollador del *hardware* y el *software* para obtener los datos de aceleración correctamente.

Una vez corregidos los problemas presentados evalué el rendimiento del sensor, la calidad de los datos recolectados y el correcto uso de las frecuencias de muestreo establecidas; observé una generación de datos mayor a lo esperada detectando que el sensor generaba datos repetidos, así como ruido que no permitía la lectura de valores reales de aceleración.

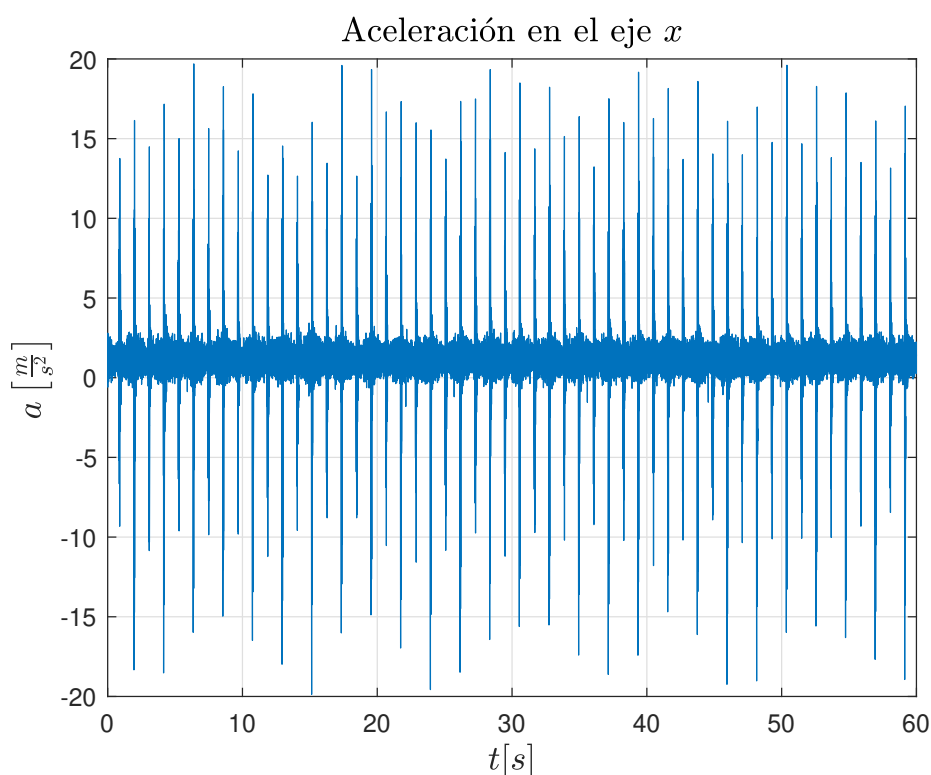


Figura 6.6: Aceleración en el eje  $x$ . Con el sensor configurado a  $2000[Hz]$  la señal obtenida en el eje  $x$  tiene el mismo periodo que la leída en los ejes  $y$  y  $z$ .

Desarrollé un código que configurara el puerto serial del dispositivo de forma que pudiera existir comunicación con el sensor. Para ello realicé las validaciones necesarias para comprobar la presencia de un dispositivo conectado al puerto, que mantuviera el intento de reconexión en caso de pérdida de la misma, enviara las configuraciones al sensor e iniciara con la lectura, extrayendo los datos del espacio de almacenamiento temporal del dispositivo, además realizara la adecuación de los datos y la genera-

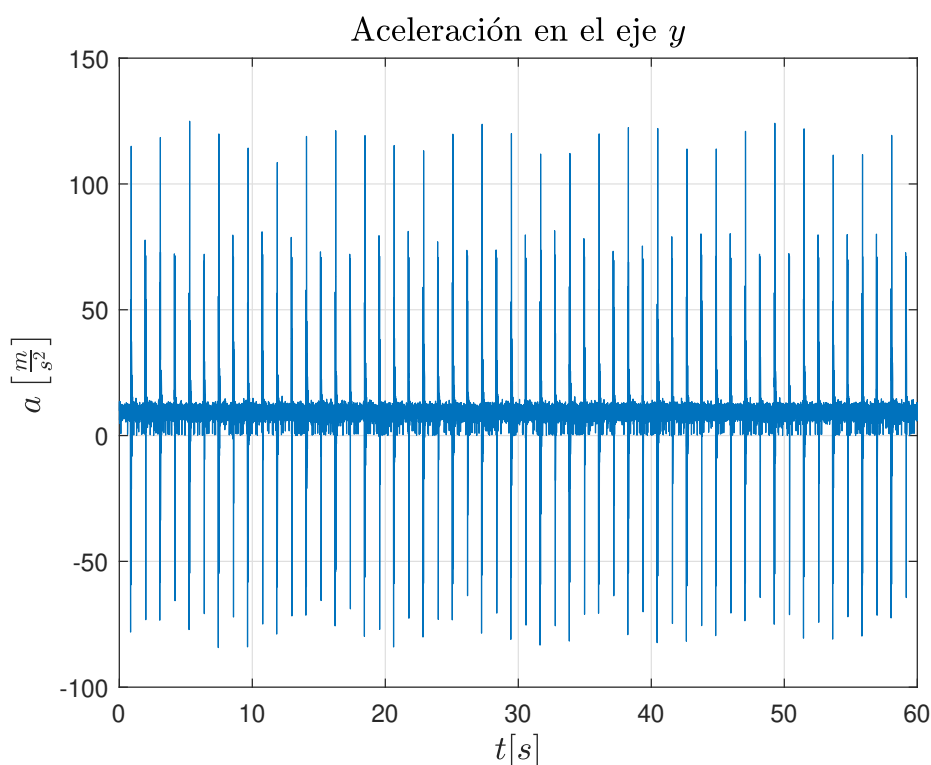


Figura 6.7: Aceleración en el eje  $y$ . Con el sensor configurado a  $2000[Hz]$ . Con una frecuencia de corte diferente la señal es más limpia.

ción de archivos con la información extraída.

Adicional, teníamos la necesidad de poder implementar actualizaciones en el sensor, por ello implementamos un módulo de actualizaciones, el cual valida la existencia de las actualizaciones en la nube, posteriormente las descarga (en caso de existir alguna) y finalmente, instala las actualizaciones y reinicia los procesos en el dispositivo.

En las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 se puede observar la señal de entrada para el algoritmo. Es importante apuntar que la señal tiene el mismo periodo y que su diferencia es la magnitud. Esto nos muestra que la frecuencia con la que vibra la estructura es la misma con la cual la máquina efectúa el golpe. Todos estos datos fueron generados a partir de un simulador. En la troqueladora real la señal se comporta de forma similar.

## 6.4. Desarrollo de algoritmos

El trabajo colaborativo ha sido la piedra angular para el desarrollo del proyecto. La generación de los códigos necesarios para el procesamiento de los datos leídos del sensor, el envío de la información al servidor web y la operación en sí misma del dispositivo, se han desarrollado en conjunto con los demás miembros del equipo. En ello mi participación se ha centrado en tareas puntuales:

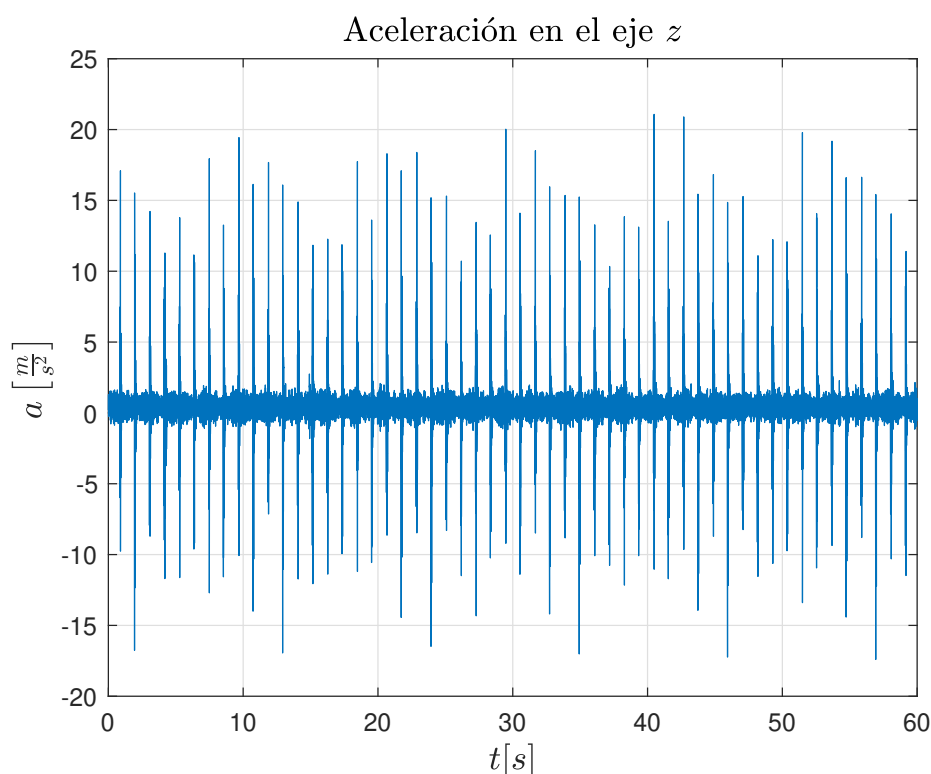


Figura 6.8: Aceleración en el eje  $z$ . Con el sensor configurado a  $2000[Hz]$  y una frecuencia de corte en el filtro de  $184[Hz]$ .

- Adecuación del envío de datos para incluir la temperatura del dispositivo.
- Modificación en el algoritmo de procesamiento de datos para incluir, según el nuevo formato de la trama, los datos leídos.
- Aportación en la optimización del algoritmo de conteo.

En la etapa actual del proyecto, donde nos interesa conocer la operación del dispositivo en la planta, no dispondremos de acceso, solo de forma remota, por lo que conocer la temperatura del procesador para identificar escenarios no previstos nos permitirá mejorar las características de operación para optimizar el rendimiento del dispositivo. Así, mi participación se enfocó en poder consultar la temperatura del procesador, convertir el valor obtenido a unidades y tipo de dato que pudiera ser transmitido por HTTPS y finalmente, modificar el envío para incluir la temperatura registrada.

El cambio del sensor implicó una modificación en el formato de envío de los datos, por lo cual fue necesario actualizar el código ya existente para la correcta operación del algoritmo. Realicé la investigación de las herramientas necesarias del lenguaje de programación utilizado para adaptar los datos leídos al formato establecido.

Los códigos desarrollados debían optimizar los recursos de *hardware* disponibles, tener a considerar la posible conexión y desconexión del sensor, la pérdida de conexión a Internet y además, la capacidad

de almacenamiento del dispositivo. Todos estos puntos quedaron cubiertos mediante el desarrollo y la implementación de una serie de servicios que, de forma paralela, validan la correcta operación de la aplicación.

### 6.4.1. Algoritmo de conteo

El principio del algoritmo es la transformada de Fourier [ $\mathcal{F}$ ]. A partir de un análisis de la señal en frecuencia podemos obtener la frecuencia fundamental del proceso, y así podemos aplicar un filtro de Butterworth<sup>3</sup> utilizando como frecuencia de corte la frecuencia fundamental obtenida con la transformada, y con ello limpiar la señal leída.

En la figura 6.10 podemos ver la aplicación de la transformada de Fourier a la señal mostrada en la figura 6.7. Es en el eje  $y$  donde está el movimiento analizado. La serie de espigas que observamos representan el comportamiento de la máquina. Un factor importante es que el ruido contenido en la señal también presenta cierta periodicidad, por lo que la frecuencia fundamental no corresponde a la frecuencia de trabajo de la troqueladora. Las espigas que observamos como armónicos son el resultado de la saturación del sensor en el cambio de dirección.

El análisis de Fourier puede brindarnos información sobre el estado de desgaste, las vibraciones anormales, la operación de la máquina, pero en este caso no se ha contemplado tal análisis.

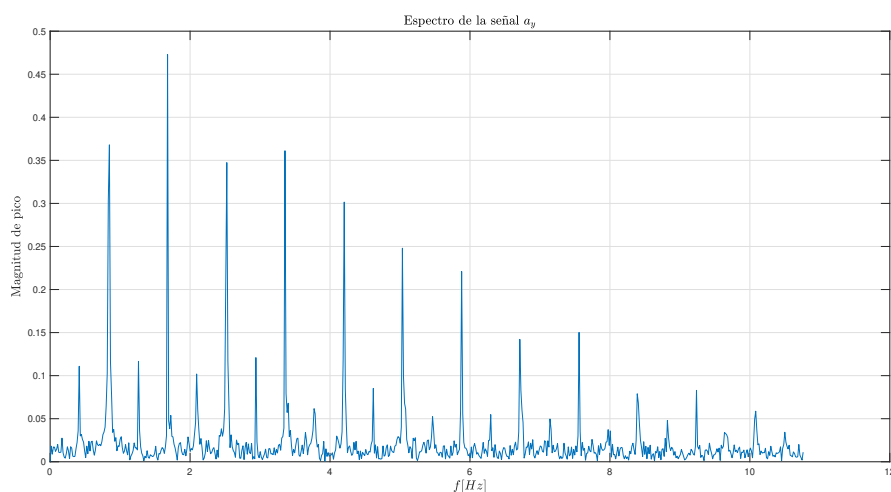


Figura 6.9: La primera espiga contiene la frecuencia del proceso de la troqueladora. La espiga de mayor nivel representa la saturación del sensor, las espigas que aparecen adelante son los armónicos de ésta.

Un filtro de Butterworth de sexto orden nos dio los resultados esperados para filtrar la señal. A partir de esta señal podemos obtener el número de golpes efectuados por el troquel en un minuto. En la figura 6.11 tenemos la señal resultante del filtro, donde es posible apreciar la forma que lleva el movimiento

<sup>3</sup>El filtro de Butterworth es un filtro electrónico caracterizado por buscar mantener una respuesta plana en la banda de paso.

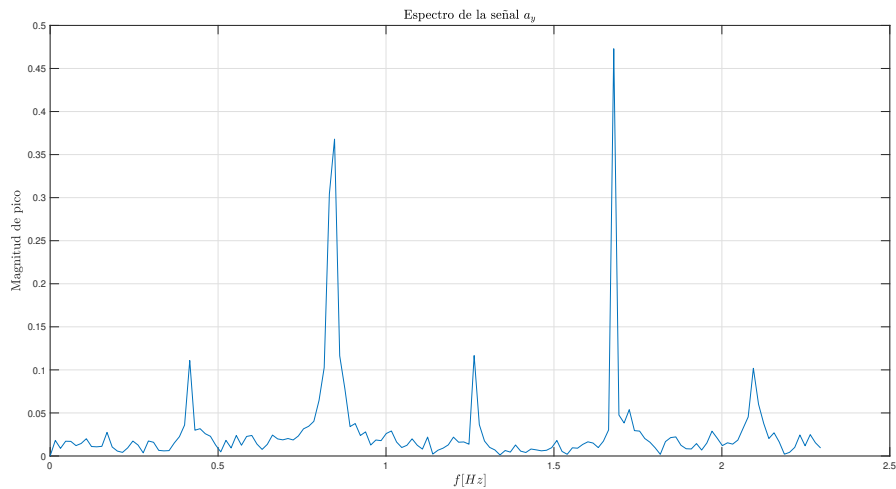


Figura 6.10: Acercamiento a la señal en frecuencia de las primeras espigas.

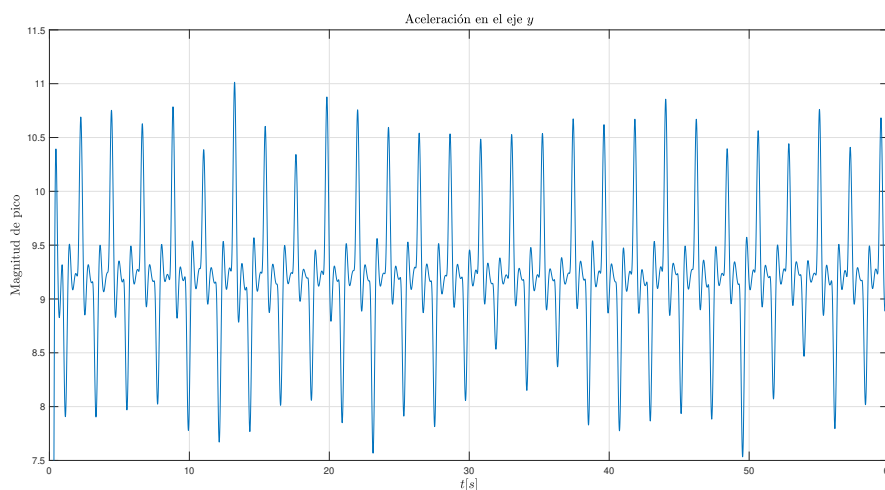


Figura 6.11: La señal resultante contiene la información sobre los golpes efectuados, los cruces por cero nos muestran este cambio de sentido en el movimiento del troquel.

del troquel. Esta señal contiene la información de los golpes realizados por la troqueladora por lo que contando los cruces por cero, obtenemos el número de ciclos por periodo. La optimización de este algoritmo resultaba importante. Probamos diferentes técnicas que nos permitieran reducir el número de datos procesados. Uno de estos procesos agregados fue un demuestreo por *software* de la señal. El demuestreo permitió aplicar el algoritmo de conteo a una menor cantidad de datos, mejorando así el tiempo de cálculo y el porcentaje de uso del CPU.

## Capítulo 7

# Metodología utilizada

EN el desarrollo del proyecto utilizamos la metodología: Planeación Avanzada de la Calidad de un Producto APQP. Esta metodología consiste en un proceso estructurado que nos asegura, en el desarrollo de un producto (o servicio), que todas las necesidades del cliente se verán satisfechas con la entrega final. Así mismo, plantea una estructuración a seguir en el desarrollo del producto incorporando una mejora continua, involucrando al cliente en el desarrollo, detectando y resolviendo fallas.

El propósito de seguir la metodología, fue el tener actualizada la información y disponible para todos los miembros del equipo. La aplicación de la metodología fue necesaria en dos aspectos diferentes. El primero de ellos, respecto a nuestros clientes potenciales, de los cuales nos interesaba conocer sus necesidades y sus restricciones para el desarrollo de una propuesta y posterior de una solución. En el segundo, cuando nosotros fungíamos como clientes del desarrollador de *hardware*, con quien realizamos un seguimiento continuo en la etapa de diseño y en la construcción del dispositivo. Proporcionamos nuestros requerimientos y las restricciones que el diseño necesario conllevaba, posterior a esto para una mejora continua evaluábamos el avance del desarrollo aportando elementos de mejora al diseño original.

En la tabla 7.1 se observan las principales actividades de acuerdo a las etapas propuesta de la metodología. Es importante señalar que de no existir una comunicación constante, el resultado puede ser diferente al esperado.



Etapa	Actividad a realizar
Planeación y definición del producto	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ <b>Objetivo del producto:</b> Ser capaz de contar el número de parte producido por minuto por el ornamental de una máquina de carrera vertical, a través de un sistema de instrumentación no invasivo.</li><li>▪ Dispositivo capaz de medir los cambios en la aceleración.</li><li>▪ Comunicación serial.</li><li>▪ Cable de conexión mayor a 1[m].</li><li>▪ No invasivo al proceso ni a la máquina.</li></ul>
Diseño y desarrollo del producto	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ <b>Sensores:</b> acelerómetro, magnetómetro, giroscopio.</li><li>▪ <b>Frecuencia de muestreo:</b> 100[Hz], 200[Hz], 500[Hz], 1000[Hz], 2000[Hz].</li><li>▪ Sujeto a normas de calidad NOM.</li><li>▪ Transmisión de datos en tiempo real por HTTPS.</li></ul>

Etapa	Actividad a realizar
Diseño y desarrollo del proceso	<p>El proceso de funcionamiento está compuesto de los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lectura de aceleración por medio del sensor</li> <li>▪ Procesamiento de los datos del sensor acumulados durante un minuto</li> <li>▪ Obtención del número de golpes dados por el ornamental</li> <li>▪ Envío de datos a un servidor web</li> <li>▪ Almacenamiento de los datos en una base de datos</li> <li>▪ Consulta de los datos a través de una interfaz con conexión a Internet</li> </ul>
Validación del producto y del proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pruebas de conexión y desconexión del dispositivo</li> <li>▪ Pruebas de temperatura</li> <li>▪ Caracterización de los sensores</li> </ul>
Producción, satisfacción del cliente y mejora continua	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instalación en sitio</li> <li>▪ Supervisión de una máquina real</li> <li>▪ Retroalimentación con el cliente</li> <li>▪ Análisis de riesgos, mejoras y corrección de errores</li> </ul>

Tabla 7.1: Descripción de las actividades según la metodología APQP.

La correcta realización de las fases de la metodología nos han llevado, del lado del proveedor de *hardware*, a un dispositivo que cumple con lo esperado. Los problemas encontrados se han solucionado

de forma que nos permitió realizar las modificaciones necesarias en dispositivos prototipo preparando todo para la producción en volúmenes considerables.

Del lado del cliente, nos permitió identificar cuáles son las máquinas y procesos en los que la solución desarrollada es funcional y descartar aquellos que, si bien realizan una operación similar, las características del proceso no nos permiten brindar una solución conforme a lo por ellos esperado.

---

## Capítulo 8

# Resultados

**T**RAS participar en el desarrollo técnico del proyecto, utilicé mis conocimientos en el área de la ingeniería para proponer las características de *hardware* necesarias para el funcionamiento del dispositivo; utilizando tanto mi criterio para proponer los requerimientos, como mi conocimiento para evaluar las opciones presentadas.

Mis aportaciones en el proyecto se centraron en el análisis del dispositivo presentado, la elaboración de la matriz de pruebas y la realización de las mismas. Esto implicó el aprendizaje de nuevos lenguajes de programación y el manejo de nuevas herramientas que me permitiesen desarrollar las actividades asignadas. La interpretación de los datos recolectados y la presentación de propuestas para solucionar los problemas detectados fueron parte importante en el proyecto. Los conceptos sobre los protocolos de comunicación en microprocesadores me facilitaron el manejo y conocimiento del nuevo dispositivo.

Durante la solución de los problemas, realicé diferentes pruebas en el *hardware* para identificar la causa. La comunicación constante, apegados a una metodología de trabajo, facilitó la evaluación de las soluciones propuestas y la resolución de los problemas identificados.

En el algoritmo, mi participación se centro en una retroalimentación de la operación del mismo, analizando los pasos y proponiendo una optimización. Fue necesario realizar diferentes pruebas hasta comprobar que las optimizaciones propuestas mejoraban la operación del algoritmo sin afectar la precisión. En línea con la funcionalidad, el desarrollo de un algoritmo basado en una herramienta matemática que me permitió emplear el conocimiento adquirido en mi formación y que además, es comercializable es otro de los logros obtenidos.

La certificación de un dispositivo bajo los estándares de calidad de México y las características de radiofrecuencia que demandan los EE. UU., y que además cumpla con la funcionalidad esperada y sea eficiente en el proceso, es uno de los resultados más tangibles del proyecto. En este momento el dispositivo se encuentra en certificación conforme a los estándares mencionados, previo a su producción.

El desarrollo de la interfaz de usuario, los servicios de la base datos y la red neuronal en la nube, que

realiza la detección de datos anómalos, también son uno de los resultados más importantes de la solución; permiten la funcionalidad en conjunto del proyecto y contienen el servicio que ofrece la compañía. Finalmente, la documentación del proyecto, tanto de los códigos desarrollados como del funcionamiento; ha formado parte importante en el proyecto.

Éste es el primer proyecto que la empresa desarrolla con estas características en el país, lo cual muestra el impacto que podemos tener al certificar un dispositivo y llevar al mercado una solución de Industria 4.0 con clientes potenciales en México y Estados Unidos.

---

## Capítulo 9

# Conclusiones

EN la última etapa del proyecto hemos conseguido realizar la supervisión de una máquina de carrera vertical mediante el uso de una IMU; tomando los datos de un acelerómetro, con el cual desarrollamos un sistema de instrumentación no invasivo que además tiene capacidad de adaptarse a máquinas que conserven el mismo principio de funcionamiento. Así mismo, conseguimos realizar el procesamiento de los datos *in situ*, y su transmisión en tiempo real utilizando un protocolo de transmisión seguro, HTTPS, hacia un servidor web. Todo esto, gracias a la adecuada selección de un procesador con capacidad para realizar las tareas esperadas de forma eficiente.

Reemplazamos el *hardware* de prototipo por uno hecho a medida que disminuye los costos de producción y es robusto para su uso en la industria. Además nos permitió estructurarlo de acuerdo con las necesidades del proyecto.

Utilizando una variable inercial podemos supervisar el proceso y contar los ciclos efectuados por el troquel, sin afectar la operación natural de la troqueladora; por ello fue necesario el uso de un sensor no intrusivo.

Desarrollé un *script* capaz de identificar el dispositivo conectado en el puerto serial, enviar la configuración al sensor según lo deseado a medir e iniciar el proceso de lectura y almacenamiento de los datos leídos en un archivo para su posterior procesamiento. Además, desarrollé un *script* para analizar la temperatura, el uso del procesador y los procesos con mayor demanda de CPU, que nos permitió evaluar la capacidad de procesamiento del dispositivo y con ello realizar una serie de modificaciones al diseño original que permitieran un adecuado funcionamiento. Evaluar el desarrollo del *hardware* fue un proceso que implicó realizar una serie de pruebas extensivas sobre el dispositivo hasta asegurar su correcta operación.

El equipo desarrolló el algoritmo de conteo de golpes a partir de los datos leídos del sensor; utilizando datos de aceleración y devolviendo número de piezas producidas por minuto. Adicionalmente, obtenemos información sobre si el golpe dado por la troqueladora presentó alguna anomalía o no; empleando

para ello una red neuronal, entrenada previamente con fallas controladas.

Iniciamos la etapa de certificación del *hardware*. Tanto el sensor como la unidad de procesamiento han sido enviados a los laboratorios de certificación. La *NOM001* y la norma *FCC* son las normas sobre las que está siendo evaluado el *hardware* previo a su comercialización en Norteamérica.

En el servicio para el usuario final, se entregaron una plataforma que permite la consulta de la información casi en tiempo real desde cualquier dispositivo con acceso a Internet, asegurando la transmisión de los datos, y un módulo de notificaciones para el usuario, el cual le brinda información sobre el estado de operación, los tiempos de paro y la detección de anomalías.

Conseguimos desarrollar un sistema de instrumentación que cumple con las características esenciales de la Industria 4.0. Hace una recolección de datos, una transmisión a un servidor web, la disponibilidad de consulta de la interfaz a través de un dispositivo con acceso a Internet y el uso de estos datos para implementar un algoritmo inteligente de detección de anomalías. De esta forma podemos contar las piezas producidas por una troqueladora por minuto, y así también recopilamos información sobre el uso del troquel.

Actualmente tenemos instalados un dispositivo en planta funcionando y la compañía tiene interés en aumentar el número al concluir la certificación del *hardware*.

---

# Bibliografía

- [1] «Cambio de la frecuencia de muestreo de la señal», *MathWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2VhbMcg>. [Accedido: 2020]
- [2] «envspectrum», *MathWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/37hdlwG>. [Accedido: 2020]
- [3] «periodogram», *MathWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3liWpLg>. [Accedido: 2020]
- [4] «Suavizado de señales», *MathWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/33rP71y>. [Accedido: 2020]
- [5] «tf2sos», *MathWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/37hNPHA>. [Accedido: 2020]
- [6] A. M. DESHPANDE, I. G. SIDDHALINGESHWAR AND N. EKABOTE, *Implementation of advanced product quality planning in engineering project*", J. Biotechnol., vol. 185, pp. S7, 2016. Available: <https://bit.ly/3qhXWEP>.
- [7] B. M. VENEGAS BRAVO, «Análisis del comportamiento dinámico del puente Marga Marga sometido al terremoto del 27 de Febrero de 2010», 2013. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3ljCxaL>.
- [8] BOSCH CONNECTED DEVICES AND SOLUTIONS GMBH. CISS – CONNECTED INDUSTRIAL SENSOR SOLUTION. 2020. Available: <https://bit.ly/2HMKfwr>
- [9] CHÁVEZ PALACIOS, JULIÁN, *Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial*. 2004. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3gSFmPL>
- [10] D. H. STAMATIS, *Advanced Product Quality Planning: The Road to Success*. 2018.
- [11] INVENSENSE INC. MPU-9250 PRODUCT SPECIFICATION, revision 1.1, California, EUA. 2016. Available: <https://bit.ly/3nWJpww>
- [12] L. C. THISSE, *Advanced quality planning: A guide for any organization*", Qual. Prog., vol. 31, (2), pp. 73-77, 1998. Available: <https://bit.ly/39u96AA>.



- [13] L. S. DALENOGARE *et al*, "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance", *Int J Prod Econ*, vol. 204, pp. 383-394, 2018. Available: <https://bit.ly/2J796vF>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- [14] JENS TRAMPE BROCH, *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. (2nd ed.) Brüel and Kjaer, 1980.
- [15] M. J. KRANZ, "Multiple Accelerometer Apparatus for Counting Rotations of an Object, and Methods of Use", 2013. Available:<https://bit.ly/37mQIMy>.
- [16] ORFANIDIS, SOPHOCLES J., *Introduction to Signal Processing*. JPrentice-Hall, 1996.
- [17] R. H. WONG, A. K. WONG AND J. E. BAILES, "Frequency, magnitude, and distribution of head impacts in Pop Warner football: The cumulative burden," *Clin. Neurol. Neurosurg.*, vol. 118, pp. 1-4, 2014. Available: <https://bit.ly/36nJ3sZ>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2013.11.036>.
- [18] RANDALL, ROBERT BOND, *Vibration-Based Condition Monitoring*. John Wiley and Sons, 2011.
- [19] ROEL, VIRGILIO, *La tercera revolución industrial y la era del conocimiento*. Universidad Editorial Mayor de San Marcos, Fondo Editorial, 1998. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3j2P05h>
- [20] RUEDA LÓPEZ, JUAN J., *La tecnología en la sociedad del siglo XXI: albores de una nueva revolución industrial*. Revista de Ciencias Sociales, 2007, no 32, p. 1-28. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3d5EGWl>.
- [21] SECRETARÍA DE ECONOMÍA, «NOM-001-SCFI-2018», junio 05, 2019.
- [22] TIMOSHENKO, STEPHEN P., STEPHEN P., *Vibration Problems In Engineering*. (1st ed.) Wolfenden Press, 1928.
- [23] W. WAHLSTER, Hannover Mess 2011, no publicado, abril,2011.

A.M.D.G. †