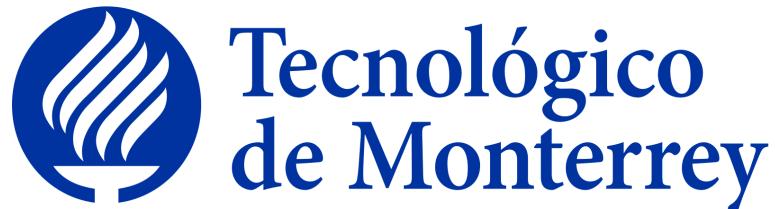


Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus, Querétaro



Sistemas y tecnologías 4.0 I (Gpo 101)

NIMBO

Estudiantes:

Carlos Iñaki Román Martínez
Eros Giovanni Guillén Velázquez
Annel Michelle Cruz Rodríguez
Abraham Sánchez Guerrero
Josué Vidales Medina

Docentes:

Ivan Fernando Hernandez Araujo
Ramona Fuentes Valdez
Maribel Ramírez Gordiano
Víctor Aldo Romero Muñoz
Alfredo Santana Reynoso

Fecha de entrega:

Martes 28 de noviembre del 2023

Tabla de contenidos

NIMBO	1
1. Introducción.	3
2. Planteamiento del problema.	3
3. Marco teórico y estado del arte.	4
3.1 Soluciones existentes.	4
4. Propuesta de solución.	5
4.1 Variables.	5
4.2 Definición de KPI's.	5
4.3 Hardware y componentes.	6
4.4 Costos.	8
4.5 Diagramas.	9
4.5.1 Diagrama modular.	9
4.5.2 Diagrama esquemático.	10
5. Diseño, desarrollo y experimentación.	11
5.1 Implementación de sistema.	11
5.1.1 Módulos.	11
5.1.2 Programas de cada módulo.	14
5.1.3 Comunicación.	15
5.1.4 Desarrollo de programa en Node Red.	15
5.2 Pruebas.	16
5.2.1 Pruebas experimentales.	16
5.2.2 Pruebas finales.	17
6. Resultados.	17
6.1 Diseño de experimentos.	18
6.1.1 Resultados Diseño de Experimentos.	19
6.2 Sistema de monitoreo.	25
7. Conclusiones.	27
8. Referencias.	28
9. Anexos.	28
10. Coevaluación.	29

1. Introducción.

El proyecto tiene como objetivo principal abordar los desafíos que surgen en el contexto de la Industria 4.0 mediante la implementación de estrategias educativas innovadoras. A través de un enfoque integral, se busca no solo proporcionar conocimientos teóricos, sino también fomentar habilidades prácticas que nos preparen para enfrentar los retos cambiantes del entorno de la industrial actual y los de la vida laboral futura.

Servimetal, como socio formador, permitirá realizar la implementación de la industria 4.0 en su empresa, con la finalidad de mejorar el desempeño de sus máquinas.

2. Planteamiento del problema.

Con base en la metodología de design thinking, se aborda el presente de reto de la siguiente manera: Empatizar, definir, idear, prototipar, y probar.

Empatizar.

Servimetal es una empresa con 15 años de experiencia, que promueve las nuevas tecnologías de corte y fabricación metálica.

Definir.

La problemática encontrada es la falta de monitoreo de las máquinas y consumibles en tiempo real.

Idear.

Para ello se realiza una propuesta que permitirá ver cómo está trabajando la máquina en tiempo real. Midiendo las vibraciones, señal de la tarjeta controladora, corriente y posición a través de sensores conectadas a diferentes ESP32 que transmitirán los datos por medio de MQTT a AWS y a node-red, para su almacenamiento y visualización.

Prototipar.

Se montan los sensores sobre los componentes a monitorear, con apoyo de cajas para sujeción. Haciendo prototipos hasta encontrar la sujeción más eficiente y el mejor funcionamiento del sistema embebido a implementar.

Probar.

Se realizan varias pruebas para corroborar que todo los sensores y sistemas funcionen correctamente.

3. Marco teórico y estado del arte.

En esta sección se abordan los pilares fundamentales de la investigación, los cuales ofrecen el contexto teórico indispensable para la situación problema presentada.

3.1 Soluciones existentes.

Existen empresas que se dedican a ofrecer monitoreo e interfaces para visualizar el estado en tiempo real de la máquina, como WizFactory y Traxian, que mandan señales de corriente, potencia, entre otros; aprovechando la conexión a ethernet de las máquinas, así como con apoyo de sensores instalados directamente en la alimentación de las máquina.

Asimismo, otra forma existente de abordar el monitoreo de máquinas de corte por chorro de agua, consiste en la utilización de sensores para el monitoreo de condición, específicamente transductores de posición lineal (Gefran ONP1-A) y transductores de agua a alta presión (Gefran TPHA-N-D-V-B05M). Esto acompañado de un caso de estudio real haciendo uso de dichos sensores en pruebas de funcionamiento, así como propuestas para la detección de fallas y clasificación de métodos. El objetivo de este sistema de monitoreo es detectar posibles desviaciones del comportamiento de control para identificar el tipo de falla que causa las observaciones anormales (Goletti, Grasso, Annoni y Colosimo, 2013).

Otro ejemplo de acciones que se están llevando a cabo para atacar el problema definido, es el caso de Jurisevic, Brissaud y Junkar, quienes definen una metodología para el monitoreo del corte por chorro de agua mediante detección de sonido. Específicamente el objetivo de este sistema es controlar o mantener la distancia de separación entre la pieza de trabajo y el cabezal, en un valor óptimo durante el proceso de corte utilizando el monitoreo del sonido generado, sonido compuesto por diferentes mecanismos complejos. Esto con la intención de contar con una producción más eficiente en términos de calidad y costos (Jurisevic, Brissaud y Junkar, 2004).

4. Propuesta de solución.

Para generar la propuesta de solución, se definen algunos aspectos que generen valor al socio formador, a continuación se mostrará el sistema a implementar. Este se desarrolla a través de 4 módulos diferentes: Vibraciones, consumo energético, señales de la máquina y estado de corte. De los cuales se extrae información relevante a través de sistemas embebidos utilizando sensores y microcontroladores, así como una interfaz destinada a uso exclusivo del operador. Esta información es comunicada y posteriormente desplegada a través de dos diferentes dashboards, uno local para monitoreo en tiempo real de la máquina y otro en la nube, alojado en Amazon Web Services, para monitoreo periódico de forma remota. De tal forma que esta propuesta busca generar un sistema de monitoreo para la máquina de corte por chorro de agua que esté interconectado tanto de forma local como renta a través de servicios en la Nube, donde no solo se pueda dar seguimiento del funcionamiento de la máquina, sino que además se pueda obtener la información recopilada para la toma de decisiones.

4.1 Variables.

Para establecer un sistema de monitoreo de valor, es necesario definir las variables, puesto que de estas depende la futura toma de decisiones con base en la información dada por la máquina. De tal forma, que el sistema se encuentra definido por las siguientes variables:

- Consumo energético (Corriente/Voltaje/Potencia).
- Vibraciones.
- Señal de chorro.
- Estado de corte.
- Voz de operador.

Es con base en dichas variables que se desarrollan los diferentes módulos que se presentan a detalle en el presente reporte.

4.2 Definición de KPI's.

Los datos que se obtienen con los sensores permiten medir distintos parámetros, con los cuales, se pueden definir algunos KPI's de valor, tales que:

El Overall Equipment Effectiveness es un indicador utilizado para la gestión de producción y operaciones industriales.

$$OEE = \text{Disponibilidad} \cdot \text{Rendimiento} \cdot \text{Calidad}$$

- $\text{Calidad} = \frac{\text{Piezas conformes}}{\text{Total de piezas producidas}}$
- $\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo total de corte}}{\text{Jornada laboral (8 horas)}}$
- $\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia utilizada}}{\text{Potencia máxima del motor}}$

El tiempo de inactividad es esencial para comprender y mejorar la eficiencia del proceso de producción, asimismo, proporciona información valiosa sobre las interrupciones y las causas subyacentes que pueden afectar negativamente a la productividad.

$$\text{Tiempo de inactividad} = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Tiempo total de inactividad}}$$

Medir el tiempo de vida de la boquilla es esencial para la gestión eficiente de los recursos, la calidad del producto y la seguridad. Facilita la toma de decisiones informadas sobre el mantenimiento preventivo y la optimización del proceso.

$$\text{Vida útil de la boquilla} = \text{Tiempo de cambio} - \text{Tiempo de uso}$$

El costo energético es útil para la gestión financiera, la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento normativo. Proporciona información valiosa para la toma de decisiones informadas, como lo son ahorros significativos y una gestión más responsable de los recursos energéticos. En este caso se considera una demanda pequeña en baja tensión (PBDT), por lo que se asigna una tarifa de 3.917 por kWh.

$$\text{Costo energético} = \text{Potencia (KWh)} * \text{Tarifa mensual}$$

4.3 Hardware y componentes.

Para la propuesta de solución se considera el siguiente hardware y demás componentes necesarios para la implementación del sistema. Esto incluyendo las respectivas cantidades y costos.

Componente	Descripción	Especificaciones técnicas
ESP32 x3 (\$195.00 c/u)	Microcontrolador con conexión a la red programado a través de Arduino	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador Tensilica Xtenza 32bits LX6 hasta 240MHz • Wifi: 2.4 Ghz hasta 150 Mbit/s • Voltaje: 3.3 Vdc
MPU-6050 x1 (\$70.00)	Sensor de vibraciones: acelerómetro en 3 ejes y giroscopio en 3 ejes	<ul style="list-style-type: none"> • 3V - 5V • Rango de aceleración: $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$ g • Rango del giroscopio: + 250500 1000 2000 ° / s • Comunicación 12C
PZEM-004T/PZC T-02 x3 (\$327.00 c/u)	Medidor de energía eléctrica y voltaje	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de trabajo: 80 - 260 Vac • Frecuencia: 45 - 56 Hz • Rango de potencia: 0 a 22 kW • Rango de energía: 0 a 9999 kWh • Rango de voltaje: 80 a 260 Vac • Rango de corriente: 0 a 100A
Cámara web x1 (\$339.00)	Es un dispositivo que captura imágenes y graba videos en tiempo real	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución: Full HD • USB • Micrófono integrado
Tripie x1 (\$955.00)	Tripie para colocar la cámara web	<ul style="list-style-type: none"> • 1.56 m • Aluminio
Cable extensor (\$159.00 c/u)	Cable extensor para conectar módulo de señales y cámara web a la Raspberry Pi4	<ul style="list-style-type: none"> • 3.6 m • Conectores dorados reforzados
Raspberry Pi4 x1 (\$2,085.00)	Ordenador con conexión a la red para procesar los datos recopilados	<ul style="list-style-type: none"> • Quad core Cortex-A72 1.8 GHZ • 4 GB LPDDR4-3200 SDRAM • 2 puertos USB 3.0

		<ul style="list-style-type: none"> ● 2 puertos USB 2.0 ● 2 puertos micro-HDMI ● 5V ● 3A
--	--	---

Tabla 1. Hardware y componentes.

4.4 Costos.

Se presentará una visión general de los costos asociados al proyecto MIMBO. Los costos se han calculado de la siguiente manera:

- Mano de obra

Esto corresponde al costo por semana de cada integrante del equipo, que se trabajo durante este periodo (16 semanas).

- Materiales

Se ha realizado una lista de los costos de cada material utilizado para la implementación del proyecto.

- Mantenimiento mensual

Se necesita mantenimiento para supervisar que todos los componentes funcionen correctamente.

- Instalación inicial

Costo de la implementación del sistema considerando mano de obra y pruebas iniciales.

- Software

Se refiere al costo mensual de la interfaz y servidores AWS. Esto dependerá de la capacidad de almacenamiento que se requiera.

A continuación se desglosan los costos del proyecto NIMBO:

Mano de obra - \$160,000 pesos

Materiales - \$10,213 pesos

Mantenimiento mensual - \$1,500 pesos

Instalcion inicial - \$10,000 pesos

Software - (Amazon Web Services) Costo variable

Costos: [Anexos](#)

4.5 Diagramas.

El desarrollo de los diagramas ayudan de forma visual a ver cómo está conectado el hardware y los diferentes componentes que forman el sistema, permitiendo a entender fácilmente cómo opera el sistema desarrollado.

4.5.1 Diagrama modular.

El diagrama modular es la representación de cómo están conectados los sensores desde la energía (batería) hasta la visualización de sus datos a través de dashboards, ya sea de forma local (en planta) o en la nube (accesible de forma remota).

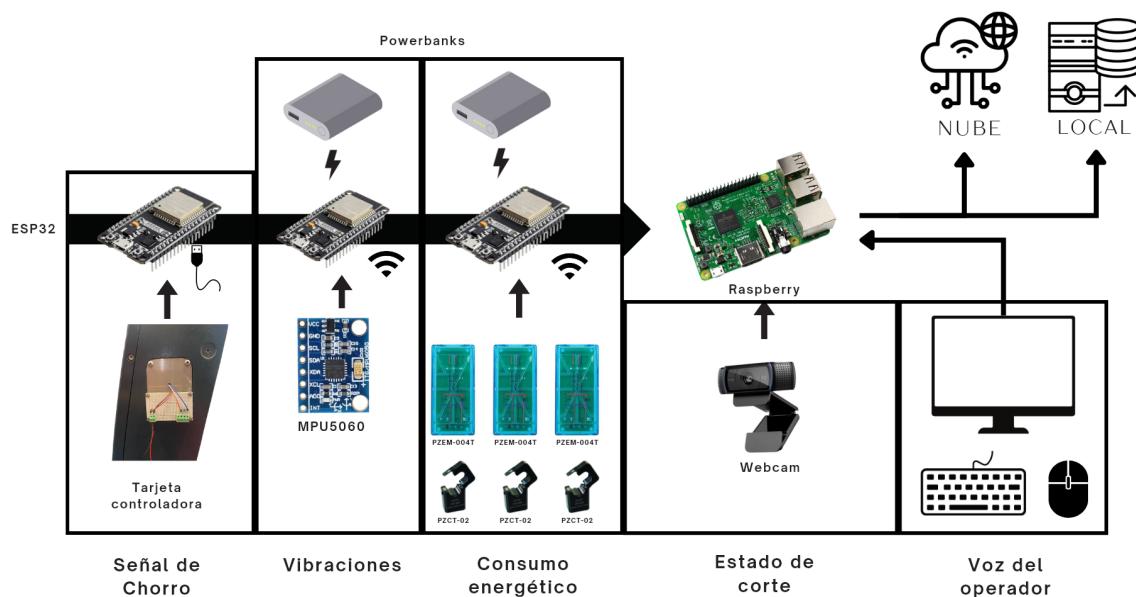


Figura 1. Diagrama modular.

Mientras que el diagrama que se presenta en la figura 2 muestra la solución que se presenta de forma integral, donde se observa cómo la información saliente de sensores e interfaz de operador es comunicada y almacenada de forma local y remota para la generación de dashboards.

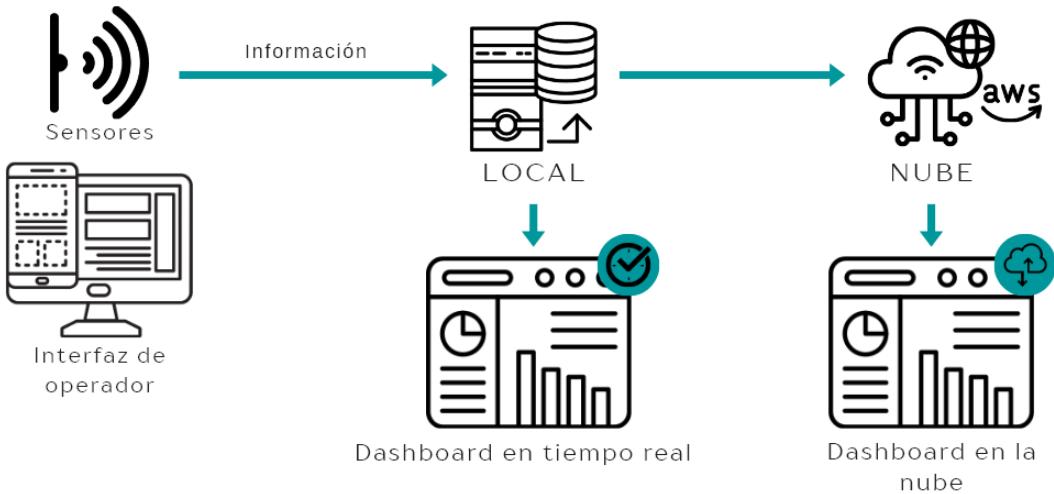


Figura 2. Diagrama integral de la solución..

4.5.2 Diagrama esquemático.

En el diagrama esquemático se muestra de forma robusta cómo están conectados los sensores, mostrando las diferentes conexiones, alimentación, etc. Esto para comprender de forma detallada la interconexión de los microcontroladores y los diferentes sensores que presenta la solución.

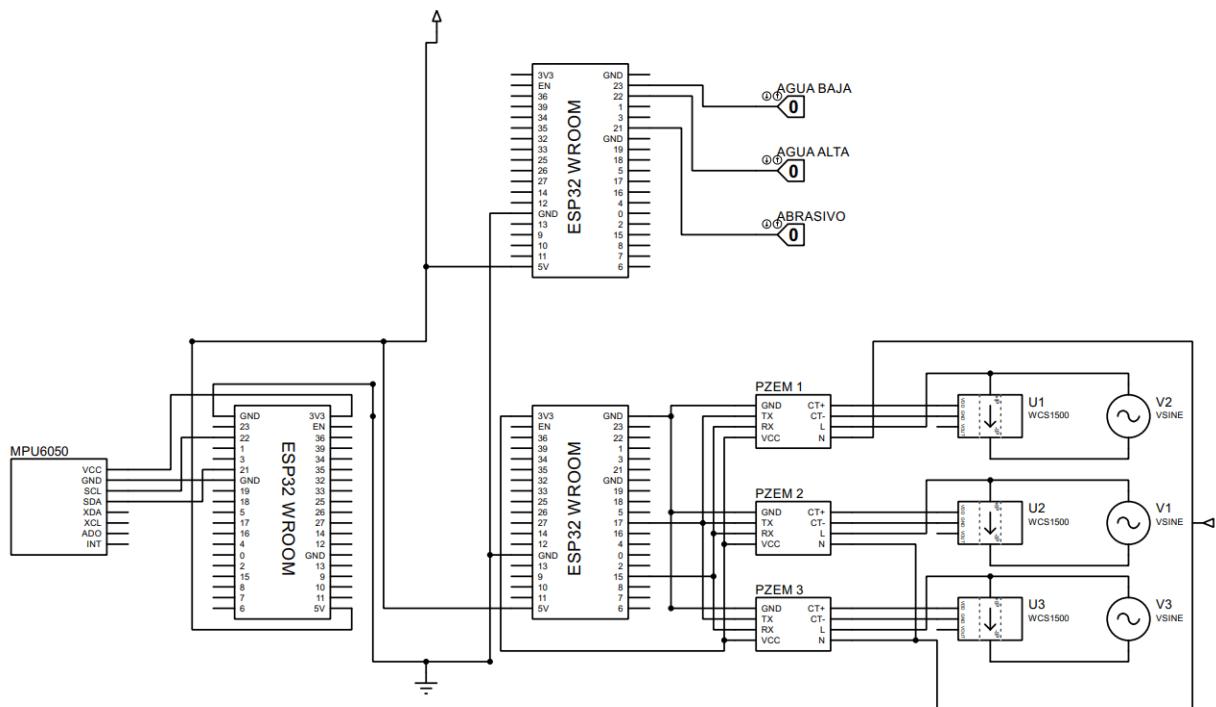


Figura 3. Diagrama esquemático.

5. Diseño, desarrollo y experimentación.

Conocer las problemáticas permite diseñar y desarrollar los circuitos de los sensores que se implementarán. Acompañada de una descripción detallada de cómo funciona el hardware y software.

5.1 Implementación de sistema.

El sistema se desarrolla con la premisa de que no ser invasivo y tampoco un obstáculo al momento de trabajar con la máquina, por lo que se realizaron cajas protectoras para mantener en buen estado los cables y conexiones de cada módulo, colocándolos en lugares estratégicos para la recolecta de información, buscando su mejor desempeño y funcionamiento. El desarrollo del sistema está compuesto por diferentes etapas, primero la sensorización, después la comunicación, en este caso a través de MQTT para comunicar la información de los sensores con NodeRed y AWS, para finalmente despegar la información más relevante y de valor mediante Dashboards para monitoreo.

5.1.1 Módulos.

Señal chorro de tarjeta.

Compuesto por un ESP32 que está directamente conectado a la tarjeta controladora de la máquina para leer el estado de corte, ya sea corte con presión alta o baja, con o sin abrasivo. Este módulo, se encuentra protegido por una caja que también permite conexión con la Raspberry Pi para procesamiento de la información y alimentación.



Figura 4. Módulo de señal de chorro de tarjeta controladora.

Vibraciones.

Este módulo se compone por un sensor MPU5060 montado sobre el motor, con ayuda de una caja protectora diseñada e impresa con manufactura aditiva y colocada con velcro. Conectada a una batería para su alimentación, comunicándose a través de Wifi con la Raspberry mediante MQTT.

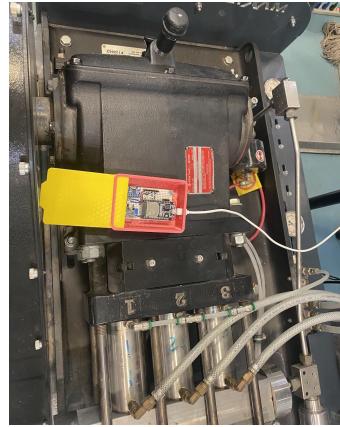


Figura 5. Módulo de vibraciones.

Consumo energético.

Respecto a este módulo, se cuenta con 3 diferentes sensores de efecto hall (PZCT-02) conectados a las 3 diferentes fases salientes de la bomba. Los PZCT-02 están conectados a sus respectivos PZEM-004T para su comunicación con el ESP32 mediante Wifi y MQTT.

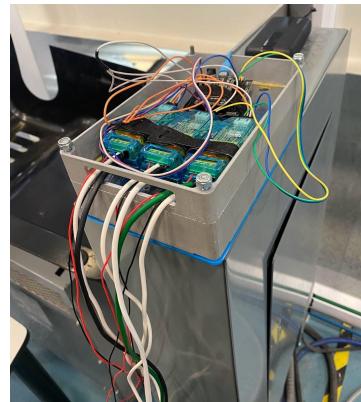


Figura 6. Módulo de energía.

Estado de corte.

Asimismo, se cuenta con una cámara web para poder observar lo que se está cortando en tiempo real. Se monta con un trípode de 1.6 m para la visualización adecuada de los cortes.



Figura 7. Módulo de estado de corte..

Interfaz de operador.

Por último, se cuenta con una interfaz para uso del operador, quien podrá ingresar los datos y detalles del corte en desarrollo; inicializará y detendrá el cronómetro para medir el tiempo real del corte. Estos datos se guardan y son almacenados de forma local y respectivamente en la nube.

Monitoreo de la máquina

Por favor introduce la información de la máquina:

Nombre del trabajo:
 Cliente:
 Tiempo de corte a:
 Detalle:

50
 Tiempo de corte aproximado

Iniciar Contador Detener Contador
Enviar []
Cancelar []

Tiempo Transcurrido (s): 0.00

Search

Fecha	Hora	Nombre del trabajo	Cliente	Tiempo de corte ap
2023-09-18	19:18:44	trabajo2	cliente2	10

Figura 8. Interfaz de operador

Esta interfaz es de alta importancia para la recolección de información necesaria para el cálculo de los KPI's.

5.1.2 Programas de cada módulo.

Vibraciones:

En este apartado se está utilizando un sensor MPU6050, que, gracias a las librerías proporcionadas por los desarrolladores, se puede acceder a los datos del giroscopio y acelerómetro, en este caso se utilizan los datos proporcionados por el acelerómetro, que, con una función matemática, se puede obtener la aceleración absoluta, la cual, indica la fuerza del movimiento de la bomba.

Señales:

Para obtener las señales digitales del estado de la máquina, se facilita una placa fenólica, la cual, cuenta con los cables necesarios para obtener estas señales.

Para procesarlas, se utiliza el puerto serial de la tarjeta ESP32, lo que permite obtener 3 señales, las cuales son:

- Agua a presión alta
- Agua a presión baja
- Uso de abrasivo

Con esto, se puede conocer qué está haciendo la máquina, y utilizarlo para inicializar la captura de los datos tanto del sensor de vibraciones, así como el consumo energético.

Consumo energético:

Utilizando 3 PZEM-004T, se obtiene 3 datos de las 3 fases que requiere la máquina para funcionar:

- La energía que ha consumido desde que se conectaron, la cual, nos ayuda a conocer el coste energético.
- La potencia utilizada, que, con la cual, podemos advertir al usuario si existe una sobrecarga que pueda dañar el equipo.
- La corriente.

Esto se obtiene gracias a los ganchos, que por medio del efecto Hall, lo que ayuda a conocer los datos ya mencionados, sin intervenir la máquina, siendo estos, no invasivos.

Tiempo de uso:

Aprovechando el poco tráfico que genera el sensor de vibraciones, se añade un contador de uso, el cual, se activa cuando la máquina está en funcionamiento dentro del horario laboral, es decir, si la máquina está operando en un horario de 8 a.m a 5 p.m, que, una vez finalizada la jornada, el contador se reinicia, y se puede conocer la disponibilidad que tuvo ese dia.

Los programas en arduino de cada módulo se encuentran en la sección 9. *Anexos*:

Códigos: [Anexos](#)

5.1.3 Comunicación.

Para la comunicación de los diferentes módulos con NodeRed y con la nube de Amazon Web Services se utiliza el protocolo MQTT de Mosquitto, este en conjunto con el programa de Python presente en la Raspberry, se encarga de la comunicación entre los diferentes módulos que componen el sistema.

Mosquitto se utiliza como broker, el cual funciona a través de publicaciones y suscripciones a través de tópicos, esto mediante la implementación del protocolo MQTT, el cual es ligero y adecuado para uso de todo tipo de dispositivos, desde de dispositivos de bajo consumo, hasta en aplicaciones con servidores (Mosquitto). Siendo un protocolo ideal para este proyecto, puesto que es altamente aplicable para mensajes mediante el Internet de las cosas (IoT) y comunicando con sensores de baja potencia y microcontroladores, en este caso, ESP32.

De tal forma, que los diferentes valores dados por los sensores, son comunicados a Node Red mediante diferentes tópicos, lo que permite visualizar el funcionamiento de la máquina en ambos dashboards propuestos, es decir, local y en tiempo real, así como periodico y de forma remota.

5.1.4 Desarrollo de programa en Node Red.

Node-RED es una herramienta para la creación de dashboards. Para la implementación del programa en Node-RED, se requiere la creación de flujos visuales. A continuación, se detalla el proceso para generar el panel de control local del proyecto:

En la primera parte se colocan nodos de entrada (lectura de sensores) para obtener los datos que se desean visualizar en las gráficas. Se añaden nodos de gráficas que permiten configurar el tipo de gráfica a considerar (líneas, barras, pastel, etc.). Todos los datos obtenidos se almacenan en un excel.

Posteriormente, se presentan los valores que indican la presión a la que opera la máquina durante los cortes, ya sea en condiciones de alta, baja, con o sin abrasivo. Estos datos son visualizados en el dashboard y se registran de manera continua en una hoja de cálculo Excel para su seguimiento y análisis.

Por último, se indica si la máquina tiene una falla, necesita mantenimiento o si hay una emergencia, mediante un Andon con las siguientes condiciones:

- Rojo: Máquina parada por emergencia, requiere atención inmediata.
- Naranja: Paro por falla. (Parpadeo en caso de mantenimiento)
- Verde: Máquina encendida en operación.
- Azul: Máquina encendida sin operar.

Código: [Anexos](#)

5.2 Pruebas.

Se desarrollan pruebas para conocer el funcionamiento del proyecto NIMBO, es decir, que al momento de cortar una pieza todo funcione (interfaz, dashboard local y de la nube, sensores, etc) y se guarden los datos para posteriormente efectuar su análisis.

5.2.1 Pruebas experimentales.

Se realizan diferentes pruebas experimentales recolectando datos y visualizandolos en los diferentes dashboards para dar seguimiento del funcionamiento del sistema desarrollado. Estas pruebas permiten conocer los errores presentes al momento de realizar cortes. La siguiente figura muestra algunos de los datos recabados en esta prueba.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tipo_corte	Current_1	Voltage_1	Current_2	Current_3	Voltage_3	formattedTimestamp	stringPersonalizado
2	alta	20.71	238.5	19.94	22.09	238.3	08/11/2023 15:46:50	1
3	20.71	238.5	19.94	22.09	238.3	9.72	08/11/2023 15:46:51	1
4	12.49	20.71	238.5	19.94	22.09	238.3	08/11/2023 15:46:51	1
5	9	20.71	238.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
6	9.14	20.71	238.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
7	20.71	11.34	238.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
8	20.71	238.5	19.78	21.83	240.4	10.26	08/11/2023 15:46:51	1
9	12.46	20.65	241.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
10	9.4	20.65	241.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
11	13.82	20.65	241.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
12	11.56	20.65	241.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
13	20.65	241.5	19.78	21.83	7.88	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
14	12.06	20.65	241.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
15	20.65	241.5	19.78	8.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1
16	20.65	9.28	241.5	19.78	21.83	240.4	08/11/2023 15:46:51	1

Figura 9. Resultados de pruebas experimentales.

5.2.2 Pruebas finales.

Las pruebas finales se relacionan con el diseño de experimentos, donde se corroboran que los sensores funcionen todo momento en el que se está realizando los cortes y que los dashboards, local y de la nube, se puedan visualizar de forma idónea. También se limpia y se hace una corrección de errores en los registros, permitiendo generar una base de datos de valor para análisis. De igual forma, la siguiente figura muestra algunos de los datos recolectados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Current_1	Accelerat	Voltage_1	Current_2	Voltage_1	Current_3	Voltage_1	Power	formattedTimestamp	stringPers
2	20.43	8.73	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
3	8.31	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
4	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	12.23	14/11/23 15:53	1
5	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	8.97	14/11/23 15:53	1
6	20.43	242.4	18.95	243	21.11	13.44	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
7	8.71	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
8	20.43	242.4	18.95	9.32	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
9	9.81	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
10	11.6	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
11	9.26	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
12	11.69	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
13	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9.95	9054.4	14/11/23 15:53	1
14	13.08	20.43	242.4	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1
15	20.43	242.4	8.02	18.95	243	21.11	241	9054.4	14/11/23 15:53	1

Figura 10. Resultados de pruebas finales..

6. Resultados.

Ya con el sistema implementado y completado en su mayoría, es necesario hacer mención de los resultados obtenidos, primeramente en relación al diseño de experimentos y finalmente acerca del sistema y su funcionamiento general.

Para obtener los resultados del diseño de experimento, se analizan los datos obtenidos con ayuda de software, específicamente Minitab, que permite realizar todo el análisis y poder concluir en una hipótesis referente a los resultados obtenidos.

6.1 Diseño de experimentos.

Se realiza un Diseño de Experimentos de 4 factores y 2 niveles con la finalidad de validar la influencia de los parámetros sobre algunas variables. Se registran los datos de corriente, voltaje, potencia y tiempo obtenidos con diferentes factores:

- Calidad
 - 1
 - 5
- Material
 - Aluminio
 - Lamina Galvanizada
- Presión
 - Alta
 - Baja
- Programa
 - Placa
 - Medalla

Utilizando la siguiente configuración considerando un diseño de experimentos fraccionado a la mitad con 2 réplicas, resultando en 16 diferentes combinaciones.

Corte	Calidad	Material	Presión	Programa
1	1	Aluminio	Alta	Placa
2	5	Aluminio	Baja	Placa
3	1	Aluminio	Baja	Medalla
4	1	Aluminio	Baja	Medalla
5	1	Aluminio	Alta	Placa
6	5	Aluminio	Alta	Medalla

7	5	Aluminio	Baja	Placa
8	5	Aluminio	Alta	Medalla
9	1	Lámina Galv.	Alta	Medalla
10	1	Lámina Galv.	Baja	Placa
11	5	Lámina Galv.	Alta	Placa
12	1	Lámina Galv.	Alta	Medalla
13	5	Lámina Galv.	Baja	Medalla
14	1	Lámina Galv.	Baja	Placa
15	5	Lámina Galv.	Alta	Placa
16	5	Lámina Galv.	Baja	Medalla

Tabla 2. Propuesta de diseño de experimentos.

Esto con la intención de determinar la significancia de los diferentes factores y sus niveles en las siguientes variables:

- Vibraciones.
- Potencia (dependiente de la corriente y voltaje).
- Tiempo.

6.1.1 Resultados Diseño de Experimentos.

Tras realizar el diseño de experimentos se obtienen los 16 diferentes cortes (figura 11), además de alrededor de 24,000 registros para poder realizar el análisis factorial correspondiente.



Figura 11. Cortes del diseño de experimentos.

Primeramente es importante definir la hipótesis nula del diseño de experimentos. Donde se establece que todos los factores afectan de forma significativa a las variables definidas (Vibraciones, Potencia y Tiempo).

Es importante mencionar que antes de realizar el análisis factorial se realiza la limpieza de los datos, de tal forma que se remueva información que pueda provocar ruido al modelo, resultando en alrededor de 12,000 datos disponibles para su análisis. Asimismo, se utiliza la media de las variables.

Análisis de vibraciones.

Considerando que se utiliza la media de las vibraciones para cada experimento, se realiza el respectivo diseño factorial, resultando en las siguientes observaciones:

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef EE	del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		17.779		0.131	135.62	0.000
Calidad	0.323	0.162		0.131	1.23	0.253 1.00
Material	0.132	0.066		0.131	0.50	0.627 1.00
Presión	1.874	0.937		0.131	7.15	0.000 1.00
Programa	-0.030	-0.015		0.131	-0.11	0.912 1.00
Calidad*Material	-0.058	-0.029		0.131	-0.22	0.831 1.00
Calidad*Presión	-0.161	-0.081		0.131	-0.62	0.556 1.00
Calidad*Programa	-0.019	-0.010		0.131	-0.07	0.944 1.00

Figura 12. Coeficientes análisis de vibraciones.

Resumen del modelo

	R-cuadrado		
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	(pred)
0.524380	86.96%	75.54%	47.82%

Figura 13. Resumen del modelo de las vibraciones.

Tal como se observa en las figuras, el valor de FIV, que indica la correlación entre los factores, muestra un valor por debajo de 10, es decir, existe poca correlación y son de valor para el modelo. Mientras que la R cuadrada del modelo presenta un modelo aceptable que explica el 86.96% del modelo en relación con los términos presentes.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust.	MC	Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	14.6645		2.0949		7.62	0.005
Lineal	4	14.5457		3.6364		13.22	0.001
Calidad	1	0.4175		0.4175		1.52	0.253
Material	1	0.0701		0.0701		0.25	0.627
Presión	1	14.0545		14.0545		51.11	0.000
Programa	1	0.0036		0.0036		0.01	0.912
Interacciones de 2 términos	3	0.1189		0.0396		0.14	0.931
Calidad*Material	1	0.0134		0.0134		0.05	0.831
Calidad*Presión	1	0.1040		0.1040		0.38	0.556
Calidad*Programa	1	0.0015		0.0015		0.01	0.944
Error	8	2.1998		0.2750			
Total	15	16.8643					

Figura 14. Análisis de varianzas de las vibraciones.

Asimismo, es importante mencionar que el modelo cuenta con un valor p menor al error alfa de 0.05 definido, lo que indica que es significativo. Bajo la misma definición también se muestra que el factor de presión también es significativo para el modelo que define las vibraciones. Mientras que la calidad, el material y el programa no son significativos, puesto que tiene un valor p superior a 0.005

Análisis de Potencia.

En cuanto a la potencia, se cuentan con los siguiente resultados:

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		8595.2	55.7	154.45	0.000	
Calidad	178.0	89.0	55.7	1.60	0.148	1.00
Material	80.1	40.0	55.7	0.72	0.492	1.00
Presión	1023.1	511.5	55.7	9.19	0.000	1.00
Programa	-33.1	-16.6	55.7	-0.30	0.774	1.00
Calidad*Material	-0.5	-0.2	55.7	-0.00	0.997	1.00
Calidad*Presión	-111.0	-55.5	55.7	-1.00	0.348	1.00
Calidad*Programa	-65.6	-32.8	55.7	-0.59	0.572	1.00

Figura 15. Coeficientes análisis de potencia.

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
222.604	91.75%	84.54%	67.01%

Figura 16. Resumen del modelo de la potencia.

De acuerdo con las figuras, de igual manera, no se muestra una correlación significativa entre los términos, de acuerdo con el valor de FIV. En este caso, se muestra un modelo mejor ajustado, con una R cuadrada de 91.75%, siendo buena para explicar el modelo.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust.	MC	Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	4410028	630004	12.71	0.001		
Lineal	4	4343524	1085881	21.91	0.000		
Calidad	1	126778	126778	2.56	0.148		
Material	1	25633	25633	0.52	0.492		
Presión	1	4186726	4186726	84.49	0.000		
Programa	1	4388	4388	0.09	0.774		
Interacciones de 2 términos	3	66504	22168	0.45	0.726		
Calidad*Material	1	1	1	0.00	0.997		
Calidad*Presión	1	49302	49302	0.99	0.348		
Calidad*Programa	1	17200	17200	0.35	0.572		
Error	8	396422	49553				
Total	15	4806450					

Figura 17. Análisis de varianzas de la potencia.

Asimismo, el modelo tiene un valor p menor a 0.05, siendo significativo y de igual forma, la presión es el único parámetro que es significativo para explicar el modelo, mientras que los demás factores y sus interacciones tienen una menor significancia en mayor o menor medida.

Análisis de Tiempo.

Respecto al análisis factorial del tiempo, se obtienen los siguientes resultados:

Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		114.25	2.69	42.43	0.000	
Calidad	31.00	15.50	2.69	5.76	0.000	1.00
Material	-5.75	-2.87	2.69	-1.07	0.317	1.00
Presión	-20.00	-10.00	2.69	-3.71	0.006	1.00
Programa	-1.25	-0.63	2.69	-0.23	0.822	1.00
Calidad*Material	-3.75	-1.88	2.69	-0.70	0.506	1.00
Calidad*Presión	7.00	3.50	2.69	1.30	0.230	1.00
Calidad*Programa	0.25	0.12	2.69	0.05	0.964	1.00

Figura 18. Coeficientes análisis del tiempo.

Resumen del modelo

S	R-cuadrado		
	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	(pred)
10.7703	86.28%	74.27%	45.11%

Figura 19. Resumen del modelo del tiempo.

Como se puede observar en las figuras, de igual forma no existe una correlación significativa entre los términos. Así como también se presenta un modelo aceptable para explicar el cambio respecto al tiempo con una R cuadrada de 86.28%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust.	MC	Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	5835.00		833.57	7.19	0.006	
Lineal	4	5582.50		1395.63	12.03	0.002	
Calidad	1	3844.00		3844.00	33.14	0.000	
Material	1	132.25		132.25	1.14	0.317	
Presión	1	1600.00		1600.00	13.79	0.006	
Programa	1	6.25		6.25	0.05	0.822	
Interacciones de 2 términos	3	252.50		84.17	0.73	0.565	
Calidad*Material	1	56.25		56.25	0.48	0.506	
Calidad*Presión	1	196.00		196.00	1.69	0.230	
Calidad*Programa	1	0.25		0.25	0.00	0.964	
Error	8	928.00		116.00			
Total	15	6763.00					

Figura 20. Análisis de varianzas del tiempo.

Mostrando un modelo significativo por tercera ocasión, sin embargo, en este modelo tanto la calidad como la presión son significativos para el tiempo.

Aunado a los análisis factoriales, se muestra una gráfica de cubos que muestra los resultados respecto al tiempo con diferentes configuraciones en cuanto a los factores y sus niveles.

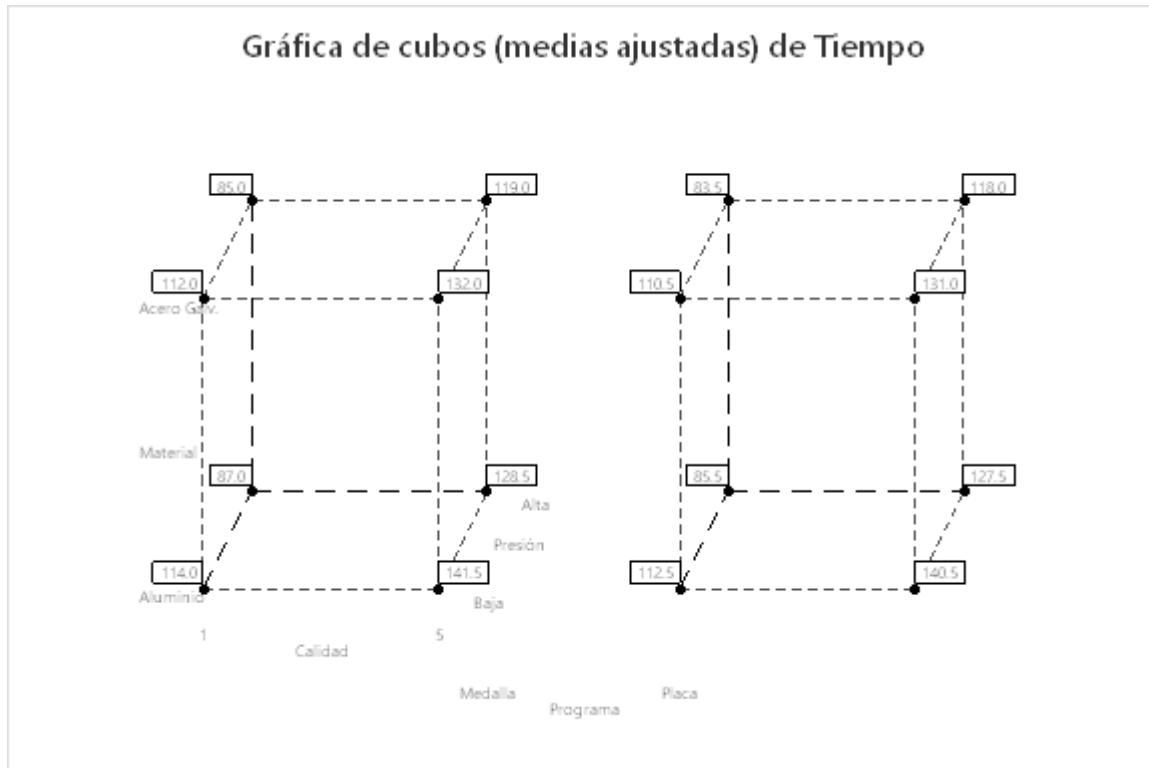


Figura 21. Gráfica de cubos del tiempo.

De tal forma que el menor tiempo está definido como el programa de la placa a presión alta a calidad 1 haciendo el corte en el material de acero galvanizado.

En la siguiente tabla se muestra en resumen la significancia de los factores sobre las variables con base en los resultados del diseño de experimentos:

Factor y niveles	Vibraciones ($p = 0.005$)	Potencia ($p = 0.01$)	Tiempo ($p = 0.006$)
Calidad	No significante ($p = 0.253$)	No significante ($p = 0.148$)	Significante ($p = 0.000$)
Material	No significante ($p = 0.627$)	No significante ($p = 0.492$)	No significante ($p = 0.317$)
Presión	Significante ($p = 0.000$)	Significante ($p = 0.000$)	Significante ($p = 0.006$)
Programa	No significante ($p = 0.912$)	No significante ($p = 0.774$)	No significante ($p = 0.822$)

Tabla 3. Resumen de los resultados del diseño de experimentos.

Es decir, con base en los análisis y resultados obtenidos, para las vibraciones se muestra un modelo con un valor p de 0.005, inferior al error, por lo que es apto para su uso, donde se indica que solo la presión es significativa. Por otro lado, el modelo de la potencia también es apto, indicando que de igual forma, la presión es el único factor significativo. Mientras que el modelo del tiempo, también apto, considera tanto la calidad como la presión factores significativos. Es decir, se rechaza la hipótesis nula, puesto que no todos los factores afectan de forma significativa sobre la vibración, la potencia y el tiempo.

ANOVA Tiempo real vs Tiempo estimado.

Del mismo modo, se realiza un Análisis de Varianzas para comparar el tiempo estimado por la máquina con el tiempo real. Esto suponiendo la siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: Las medias de ambos tiempos son iguales
- Hipótesis alterna: Las medias de ambos tiempos no son iguales.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust.	MC	Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	666.1		666.1		1.44	0.239
Error	30	13850.8			461.7		
Total	31	14516.9					

Figura 22. Análisis de varianza tiempo real vs tiempo estimado.

Donde se puede observar que el valor p del análisis es mayor al valor alfa utilizado de 0.05, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, es decir, la media de ambos tiempos no son iguales, lo que indica que hay una diferencia significativa entre el tiempo estimado por la máquina y el valor real de corte.

6.2 Sistema de monitoreo.

A continuación se muestran los resultados generales del sistema de monitoreo, considerando los diferentes módulos presentes en la máquina. como ambos dashboards, donde se pueden observar pruebas de sus funcionamiento.

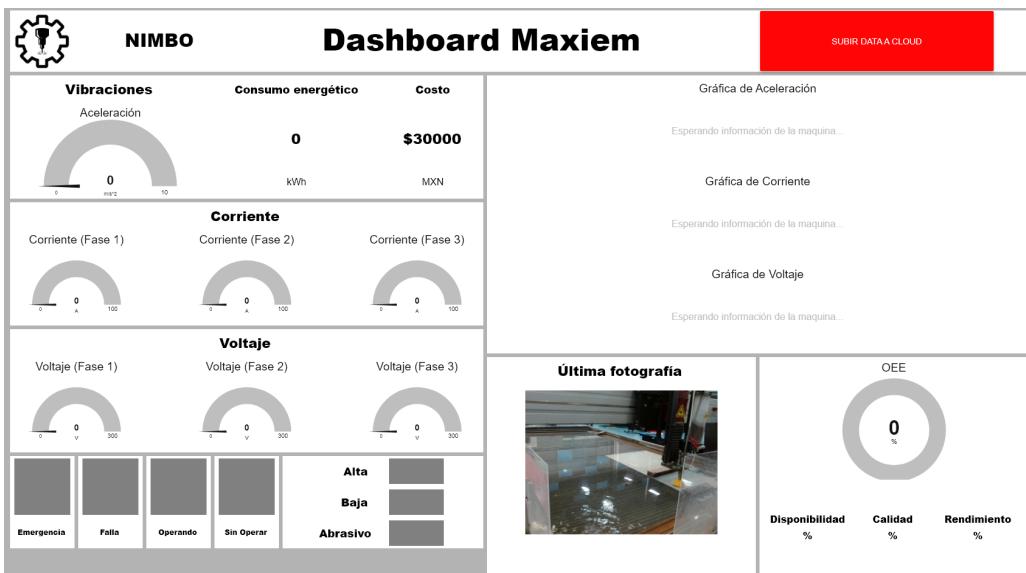


Figura 23. Dashboard local.

La primera parte muestra el valor actual de las vibraciones y de las 3 fases del voltaje y corriente. Se muestra el consumo energético en kWh, así como su costo. El cálculo del OEE junto con sus parámetros se encuentra en la esquina inferior derecha, al lado la fotografía más reciente de la máquina y a la izquierda está el ANDON para inspeccionar el estado de la máquina, así como el tipo de presión con la que se está cortando. A la derecha se grafica el historial de la aceleración del motor, corriente y voltaje.

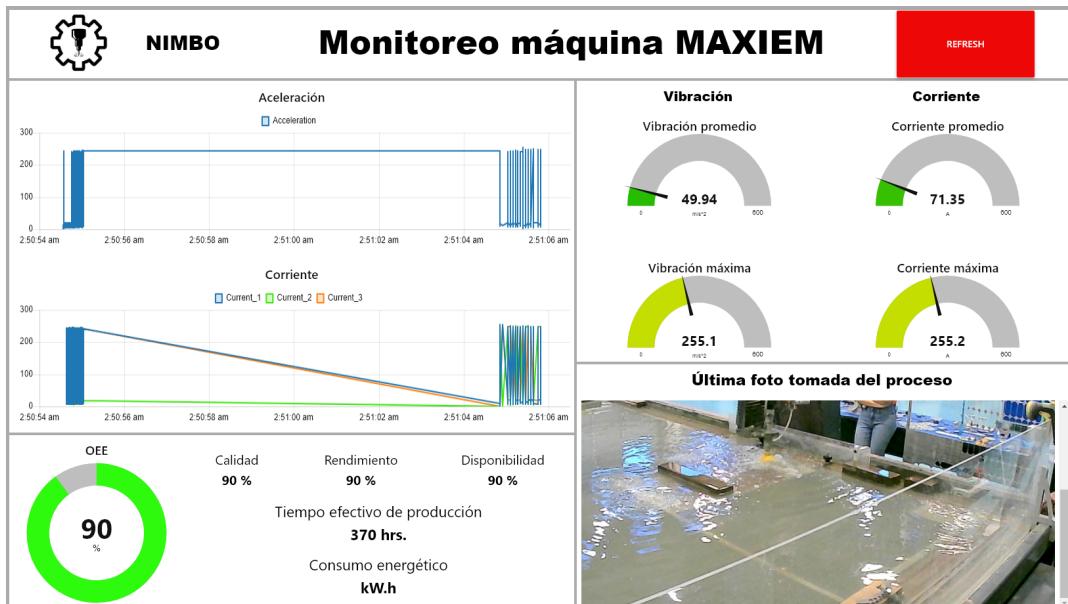


Figura 24. Dashboard remoto (Nube)

En la vista principal se despliegan las gráficas historiales de la aceleración y las 3 fases de corriente; los promedios y valores mínimos de vibración y corriente; el cálculo del OEE, tiempo de producción y consumo energético; al final se puede observar la última foto de la máquina en funcionamiento. Las pruebas del funcionamiento del sistema como resultado del proyecto se encuentran en la sección de Anexos.

7. Conclusiones.

Durante estas 17 semanas se ha desarrollado un proyecto donde se implementara la industria 4.0, para ello se colaboró un socio formador SERVIMETAL, que nos dió la oportunidad de trabajar el proyecto para su máquina de corte por chorro de agua DARDI.

El sistema de monitoreo desarrollado e implementado en la máquina MAXIEM 1530, se compone de 3 ESP32 que reciben señales de los sensores: MPU5060, 3 PZCT-02 conectados a 3 PZEM-004T y de la tarjeta madre de la máquina; una raspberry Pi que recibe datos de una webcam, así como de un forms en el que el operador puede subir información al sistema. Todos estos datos se guardan a través de AWS y se visualizan por medio del programa de Node-Red, con este último se creó un panel que muestra de manera sencilla los datos que captan los sensores en tiempo real: vibraciones del motor; voltaje, corriente y potencias utilizados por la máquina; tipo de corte y estado de la máquina. Igualmente, el panel calcula el OEE y el consumo energético de la máquina. El diseño de experimentos permitió conocer la repercusión que tienen las variables medidas sobre el tiempo de corte de la máquina, resultando en la presión (alta o baja) y la calidad del corte como aquellas que son más significativas.

Durante este tiempo trabajamos en un equipo multidisciplinario, lo que nos permitió abordar la problemática del S.F. con una visión más amplia, en la que nuestras experiencias se complementaron y facilitaron el avance de la resolución. Asimismo, la comunicación fue un papel fundamental para mantener unido nuestro equipo, desde la expresión de ideas hasta la discusión de puntos de vista y la resolución de desacuerdos, cada intercambio de información contribuyó al éxito del proyecto NIMBO.

Nuestro agradecimiento a SERVIMETAL por confiar en nosotros y brindarnos la oportunidad de contribuir a la evolución tecnológica de su empresa.

8. Referencias.

Goletti, M., Grasso, M., Annoni, M., & Colosimo, B. M. (2013). Condition monitoring of an ultra high pressure intensifier for water jet cutting machines. Procedia CIRP, 12, 193-198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113006756>

Jurisevic, B., Brissaud, D., & Junkar, M. (2004). Monitoring of abrasive water jet (AWJ) cutting using sound detection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 24, 733-737.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-003-1752-5>

Mosquitto. (s.f). Eclipse Foundation. Eclipse Mosquitto. Recuperado de:
<https://mosquitto.org/>

SERVIMETAL maquinas corte con agua. (s. f.). Servimetal. Recuperado de
<https://www.industriaservimetal.com/>

,9. Anexos.

Dashboard - Nube: <http://nimbotecmonterrey.com:1880/dashboard>

Dashboard - Local: <http://10.25.11.206:1880/ui#!/0?socketid=9gov2xWOHWTgS3o1AAAB>

Carpeta de anexos:

<https://drive.google.com/drive/folders/1XM5yz2hIYCeUES9w21YzZzOEEi5sK3vp?usp=sharing>

Programa señales digitales:

https://docs.google.com/document/d/1jvN8Nk1_IhdfXAsv748Xtlqwqn60nnBbBM7OrkugOAQ/edit?usp=drive_link

Programa sensor de vibración:

https://docs.google.com/document/d/1TDXndON10OWDebo58Fa41eOQYR7J9T_8a505og5_ipE/edit?usp=drive_link

Programa sensor de consumo energético:

https://docs.google.com/document/d/1vPAjZIQhy3T3CmDtMOjf17eLTGE1cTrRuRrjhqvrm_s/edit?usp=drive_link

Programa Dashboard local:

https://docs.google.com/document/d/1xBPqipaKTskcIUqGwDUDUXIU-ybULEN_xsG9WF_Mz25s/edit?usp=drive_link

Programa Dashboard en la Nube:

Costos:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1X5A59zYiUyrsdApLDgGHmV0NmD1ey_WCFqGYbemJqpU/edit?usp=drive_link

10. Coevaluación.

	Criterio	Contribución máxima	Carlos Román	Eros Guillén	Annel Cruz	Abraham Sánchez	Josué Vidales
1	Realizó su parte con una calidad esperada.	2	2	2	2	2	2
2	Participó de manera activa en las decisiones del equipo.	2	2	2	2	2	2
3	Se mantuvo al tanto del desarrollo del proyecto	2	2	2	2	2	2
4	Mostró una actitud proactiva	2	2	2	2	2	2
5	Realizó aportaciones de valor en el desarrollo del proyecto	2	2	2	2	2	2
	Puntuación obtenida	10	10	10	10	10	10