

SISTEMA DE TELEGESTIÓN IoT PARA LA MONITORIZACIÓN DE UN ENTORNO
INDUSTRIAL TOLERANTE A FALLOS CON MÁQUINAS CNC.

DANIEL ARTURO CASALLAS AVILA

Trabajo de grado

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA TIC,
PROGRAMA INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2025

AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a mi mamá, quien siempre estuvo apoyándome de forma incondicional. Su fuerza y confianza en mí fueron fundamentales para que nunca perdiera el ánimo, incluso en los momentos más difíciles.

Mi agradecimiento más profundo es para el profesor Luis Felipe Herrera Quintero., quien no solo fue mi director de tesis, sino también un verdadero mentor y amigo. Quien siempre me brindó su confianza y apoyo como si fuera parte de su propia familia. Su paciencia, guía y amistad fueron esenciales para completar este trabajo. Luis Felipe no solo me transmitió conocimientos técnicos, sino también valores y pasión por la ingeniería. Es un maestro excepcional y una persona muy especial para mí, a quien siempre llevaré en mis recuerdos como el mejor de los maestros y amigo.

Agradezco también al personal de los laboratorios y a la Universidad Piloto de Colombia, por facilitar los recursos, espacios y condiciones necesarias para el desarrollo de este proyecto. Su apoyo institucional fue fundamental para que este trabajo se hiciera posible.

Desde siempre me ha interesado entender cómo funcionan las máquinas y cómo se fabrican las cosas. Además, la experiencia que tengo manejando varias máquinas en mi carpintería, incluida una CNC, me inspiró a desarrollar un sistema que integrara IoT con la ingeniería para aportar soluciones prácticas.

Este proyecto representa no solo un logro académico, sino también el reflejo de mi esfuerzo y determinación. Es el inicio de un camino que abre un nuevo mundo de posibilidades para seguir aprendiendo y explorando nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial y el reconocimiento de imágenes dirigidos a la industria.

CONTENIDO

1	RESUMEN	10
2	ABSTRACT.....	11
3	INTRODUCCIÓN	12
4	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIONES	13
5	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
6	OBJETIVOS	15
6.1	OBJETIVO GENERAL.....	15
6.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
7	HIPÓTESIS.....	16
8	MARCO CONCEPTUAL.....	17
8.1	Industria 4.0	17
8.2	IoT.....	18
8.3	Bloques fundamentales de la industria 4.0	18
8.3.1	Fabricación aditiva.....	18
8.3.2	Realidad aumentada	18
8.3.3	Big Data y Analytics	19
9	MARCO TEÓRICO.....	20
9.1	DISPOSITIVOS CNC	20
9.2	SENSORES	21
10	ALCANCE Y LIMITACIONES	22
11	METODOLOGÍA	23
12	RECURSOS	24
13	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE EN REFERENCIA A LOS SISTEMAS DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN EN EL ÁMBITO DEL CONTROL CNC INCLUYENDO SUS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y ENFOQUES DE IOT.	25
13.1	Contexto CNC.....	25
13.2	Mercado Internacional que involucra CNC.	27
13.2.1	Mazak.....	27
13.2.2	Haas Automation.....	28
13.2.3	DMG Mori	29
13.2.4	Siemens	29
13.2.5	Beijing Jingdiao CO., Ltd.	30

13.3	Mercado Colombiano que involucra CNC.	31
13.3.1	Mecanizado de Precisión.	31
13.3.2	Moldes y Troqueles.	32
13.3.3	Carpintería y Mobiliario.	32
13.3.4	Electrónica y Tecnología.	32
13.3.5	Industria de la Piedra.	32
13.3.6	Educación y Formación Técnica.	32
13.3.7	Dispositivos Médicos.	32
13.3.8	Automatización Industrial.	32
13.4	Sistemas de Telegestión en CNC.	32
13.4.1	Diseño de la plataforma.	33
13.4.2	Desarrollo de Software.	33
13.4.3	Integración de Sensores.	33
13.4.4	Pruebas y Validación.	33
13.4.5	Implementación y Escalabilidad.	33
13.5	Máquinas CNC de Fresado de Tres Ejes: Funcionamiento Integrado con Código G en el Contexto de Pequeñas Empresas.	34
13.6	Máquinas CNC de Fresado en Pequeñas Industrias.	34
13.7	Tolerancia a Fallos en Sistemas de Telegestión para Máquinas CNC.	34
13.8	Protocolos usados en CNC.	35
13.9	Conclusiones Parciales.	36
14	IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES SUSCEPTIBLES A MONITORIZACIÓN Y TELEGESTIÓN PARA UN AMBIENTE DE FABRICACIÓN DE PIEZAS MECANIZADAS USANDO CNC.	37
14.1	Identificación de Variables clave.	37
14.1.1	Impacto en la calidad de las piezas.	38
14.1.2	Durabilidad de la Máquina Herramienta.	38
14.1.3	Eficiencia y productividad.	38
14.1.4	Seguridad y Prevención de Fallo.	38
14.1.5	Optimización de Procesos.	38
14.1.6	Cumplimiento de Especificaciones.	38
14.2	Elección de variables a monitorizar en el ámbito de la telegestión para un ambiente de fabricación de piezas mecanizadas usando CNC.	39
14.2.1	Velocidad de corte.	39
14.2.2	Temperatura de la herramienta.	39

14.2.3	Tiempo de mecanizado	39
14.2.4	Vibración de la máquina.	39
14.2.5	Posición y vista en video.....	39
14.2.6	Calidad del corte.	39
14.3	Conclusiones Parciales	40
15	DISEÑO DEL SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN ARTICULADO AL ÁMBITO DE CNC BASADO EN DISPOSITIVOS IoT.	41
15.1	Propuesta del Diseño: SIMCNC (Sistema de IoT de Telegestión para máquinas CNC) 41	
15.1.1	Núcleo de usuarios	42
15.1.2	Núcleo operativo.	42
15.1.3	Núcleo de ingeniería	43
15.1.4	Núcleo de integración	44
15.2	Integración de los Subsistemas y Núcleos del Sistema SIMCNC	46
15.2.1	Conexión entre Núcleos Funcionales.....	46
15.2.2	Integración de la Tecnología IoT	47
15.2.3	Conectividad y Control Remoto a través de la Interfaz de Integración	47
15.2.4	Coordinación en Tiempo Real.....	47
15.2.5	Seguridad y Control de Accesos.	47
15.3	Requerimientos generales para el Diseño del Sistema SIMCNC	48
15.3.1	Dispositivos de Captura y Supervisión en Campo	48
15.3.2	Nodos de Procesamiento Central y Almacenamiento de Datos	48
15.3.3	Terminales de Acceso y Dispositivos para Usuarios Finales	48
15.3.4	Componentes de Software y Funcionalidades Operativas del Sistema.....	48
15.3.5	Comunicación y Seguridad	49
15.3.6	Integración Funcional para la Optimización de Procesos y la Gestión en PYMES...49	
15.3.7	Tolerancia a fallos	49
15.4	Elementos de diseño	49
15.5	Conclusiones parciales.....	51
16	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN INDUSTRIAL, PARA EL ÁMBITO DE CNC.....	52
16.1	Núcleo de Usuarios.....	54
16.1.1	Registro del usuario	55
16.1.2	Aspectos clave del formulario de registro del usuario:	56
16.1.3	Proceso de Registro en el Backend	57

16.1.4	Estructura de la Base de Datos.....	57
16.2	Núcleo Operativo.....	58
16.2.1	Subsistemas de procesos de mecanizado y subsistemas de notificaciones y alertas..	59
16.2.2	Subsistema de Monitorización	61
16.3	Núcleo de Ingeniería.....	63
16.3.1	Sub. de Monitorización y Control Remoto de Máquinas CNC.....	63
16.3.2	Sub de visualización en Tiempo Real	65
16.3.3	Sub de Gestión de Órdenes de Trabajo y Registro de Producción.....	66
16.3.4	Sub de Integración IoT y Actualizaciones.....	67
16.3.5	Sub de Registro de Errores y Mantenimiento	68
16.3.6	Sub de Bases de Datos y Almacenamiento	69
16.4	Núcleo de Integración.....	71
16.4.1	Dispositivo Embebido.....	71
16.4.2	Comunicación entre Sistemas Externos e Internos	71
16.4.3	Interoperabilidad	71
16.4.4	Facilita el Control Remoto.....	71
16.5	Integración Funcional entre Subsistemas	72
16.6	Diagrama General de implementación	74
16.7	Conclusiones Parciales	75
17	GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE PRUEBAS QUE PERMITAN EVIDENCIAR LA CALIDAD DE FABRICACIÓN DE PIEZAS MECANIZADAS.....	78
17.1	Identificación de las variables críticas del proceso CNC	78
17.2	Diseño de los escenarios de prueba	79
17.2.1	Generación y Procesamiento del Archivo G -code	80
17.2.2	Envío del G-code a la Máquina CNC	81
17.3	Resultados de las Pruebas	81
17.4	Conclusiones Parciales	86
18	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN IMPLEMENTADO PARA AFIANZAR LOS PROCESOS DE DESPLIEGUE DE LOS EMPRENDIMIENTOS BASADOS EN ESTA TÉCNICA DE PIEZAS MECANIZADAS.	
	87	
18.1	Generación y Envío de G-code.....	87
18.2	Comunicación Remota y Gestión de Usuarios	87
18.3	Monitorización en Vivo	87
18.4	Pruebas de Mecanizado	88

18.5	Pruebas Sistema Tolerante a Fallos CNC.	89
18.5.1	Introducción.	89
18.5.2	Objetivo de las Pruebas.....	89
18.5.3	Alcance.	89
18.6	Flujo de Adquisición de Datos y Ejecución del G-Code	91
18.7	Capturas de Pantalla de la Interfaz	93
18.8	Muestras de Mecanizado para la Obtención de Datos	94
18.9	Manejo de Errores y Optimización del Sistema	96
18.10	Resultados y Conclusiones	97
18.11	Conclusiones parciales.....	99
19	Conclusiones.	101
20	Trabajos futuros	102
21	Referencias.....	104
22	Anexos: Fragmentos de Código y Ejemplos de Datos.....	106
22.1	Fragmento de printCNC.py:	106
22.2	Script en Bash para manejo de errores:	106
22.3	Ejemplo de CSV Generado:.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de sistemas y núcleos del SIMCNC.	46
Figura 2. Sistema de telegestión.	55
Figura 3. Login.....	56
Figura 4. Captura de la interfaz de registro.....	56
Figura 5. Vista de base de datos.....	58
Figura 6. Esquema web de usuario final.....	59
Figura 7. Esquema de código para generación de llamadas telefónicas con el API/REST de Twillio.	60
Figura 8. Diagrama de Conexión.....	61
Figura 9. Vista general de la consola de control CNC.....	63
Figura 10. Esquema de conexión RTSP entre ESP32 CAM y el sistema de monitoreo.....	65
Figura 11. Estructura de la base de datos cnc_progress.db utilizada para la ejecución de comandos G-code.	70
Figura 12. Esquema del funcionamiento del control CNC vía HTTP.....	74
Figura 13. Diagrama general de implementación del SIMCNC.....	75
Figura 14. Envío de G-code a la máquina.....	82
Figura 15. Imagen de programa de diseño.....	83
Figura 16. Imagen trabajo final y medición.....	83
Figura 17. Resultados de mecanizado por nivel de complejidad.....	84
Figura 18. Simulación digital vs resultado mecanizado.....	85
Figura 19. Tiempo vs distancia de g-code.....	86
Figura 20. Foto transmisión video RTSP.....	88
Figura 21. Gráficas generadas por CncGraphsWeb.py.....	91
Figura 22. Encabezado de la página del proceso de impresión.....	92
Figura 23. Final de la página del proceso de impresión.....	93
Figura 24. Interfaz de enlaces para el acceso a las estadísticas.....	94
Figura 25. Gráficas corriente vs tiempo.....	96
Figura 26. Ejecución del script "detenerCNC.sh"	97
Figura 27. Flujo de navegación.....	99
Figura 28. Gráficas interactivas.....	106
Figura 29. DetenerCNC.sh.....	106
Figura 30. Archivo CSV.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Rubros.24

Tabla 2. Protocolos de CNC.....36

Tabla 3. Identificación de variables susceptibles a monitorización.40

Tabla 4.Requerimientos Funcionales de Hardware y Software para el Diseño del Sistema SIMCNC.
.....50

Tabla 5. Elementos que componen la implementación.53

Tabla 6. Campos db.....70

Tabla 7. Ejemplo de escenarios de prueba diseñados.80

1 RESUMEN

El Internet de las cosas (IoT) está cambiando el mundo, y sus aplicaciones en la industria son consideradas como la nueva revolución industrial la cual, está generando nuevas oportunidades en la economía y la sociedad. La adopción del Internet de las Cosas en la industria 4.0 cambia los procesos y sistemas de fabricación planteando muchos desafíos. En la actualidad uno de los campos que ha permeado la industria 4.0 es el relacionado con el control numérico por computadora CNC, donde son producidas grandes cantidades de piezas a través de máquinas herramienta que trabajan de forma homogénea con un objetivo común. En este trabajo de grado se aborda el diseño e implementación de un sistema de telegestión y monitorización basada en IoT de un entorno industrial basado en máquinas CNC para emprendimientos colombianos. Por lo tanto, mediante esta tesis de grado se plantea una solución de telegestión que permitirá a los emprendedores colombianos poder contar con soluciones tecnológicas que, de forma desatendida, permiten alcanzar los objetivos estratégicos de las empresas considerando la calidad como uno de los elementos esenciales.

2 ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) is changing the world, and applications developed in industry are considered as the new industrial revolution generating new opportunities in the economy and society. The adoption of the Internet of Things to the development of industry 4.0 changes manufacturing processes and systems posing many challenges. The information in these applications is related to the state of production, the energy consumption behavior of machines, the movement of materials, customer orders, supplier data and, in general, any type of data associated with intelligent elements implemented in the processes.

This undergraduate work is a continuation of a previous project, where a CNC machine was built that was controlled remotely using embedded devices and IoT technology.

Building on previous experience and considering reliability as the most important factor of a CNC, followed by service-related issues, such as prompt supply of spare parts and fast service response times, which forms the basis of maximum productivity of manufacturing processes. This stage began, which is today the undergraduate work where a connectivity solution was developed, in such a way that it allowed to connect CNC devices, collect, and publish data on the mechanical and logical operations of these, by means of sensors, which can help improve production dynamics and strategies in the industrial sector; using cloud computing services aimed at IoT technology.

Key words: CNC Devices, IoT, Cloud, Industry 4.0

3 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo viene transformándose día tras día al desarrollo que viene generando el despliegue de la red de redes de internet en todos los sectores económicos. Adicionalmente, la miniaturización de los dispositivos electrónicos ha permitido el desarrollo de lo que hoy conocemos como el internet de las cosas donde, se han establecido una serie de mini - dispositivos con capacidades de cómputo, procesamiento y comunicación que sirven a diversidad de sectores en coherencia con los objetivos misionales de las empresas. Uno de los tantos sectores económicos que se ha beneficiado con esto avances tecnológicos es el sector de la fabricación industrial donde, el tamaño del mercado de máquinas herramientas ha llegado hasta los 81 billones de dólares en el año 2022 (Bekryl Market Analysts, 2022) y que espera un crecimiento a 115.6 billones para el año 2028. Uno de los habilitadores más importantes en el espectro de las maquinas herramientas es lo que llamamos el control numérico por computadora o CNC dado que a través de este, se ofrece grandes avances de máquinas que permitan proporcionar diseños de alta precisión mejoras los contornos en escenarios 2D y 3D que permitirán, contar con piezas de calidad que se acoplen a las necesidades de la industria. En mercados emergentes o en vía de desarrollo como el colombiano, las maquinas herramientas o en el contexto de CNC, se han venido utilizando de una manera no tele gestionada lo que está ocasionando (atrasos y perdidas en las líneas de producción al no contar con sistemas de monitorización adecuados que generen alertas en tiempo real ante posibles fallas y errores que se puedan presentar en el momento en que se realizan los procesos de mecanizado, corte e impresión, de hecho, la mayoría de estos procesos requieren la intervención de personal capacitado y presente en todo momento en el proceso de mecanizado. Por lo anterior, la debilidad de los sistemas CNC se presenta al momento en que estos no cuentan con sistemas de monitorización dado que, sin ellos, las maquinas herramientas no pueden corregir las instrucciones de mecanizado, lo que las lleva a ejecutar movimientos descontrolados en los procesos de fabricación donde de hecho, se pueden dañar pieza de trabajo u ocasionar daños sobre la máquina.

Por todo lo anterior mediante esta tesis de grado, aborda un diseño e implementación de un sistema de tele gestión y monitorización basada en IoT de un entorno industrial basado en máquinas CNC para emprendimientos colombianos.

4 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIONES

Dado que esta investigación se fundamenta en un proyecto anterior, enfocado en el control remoto de un dispositivo CNC de fresado, basado en la tecnología del IoT, para generar transmisión y recepción de código G, desde un terminal remoto al firmware del dispositivo mencionado, estos trabajos previos dan la base para la construcción de esta nueva investigación, que estará centrada en el despliegue de dispositivos CNC atrás vez de una plataforma de servicios en la nube, para la captura de información, análisis, control remoto, monitoreo y administración, orientados a maximizar la eficiencia en la industria, minimizar los costos y detectar nuevas variables del proceso de producción por medio del análisis de los datos recopilados.

El proyecto anteriormente mencionado busco una solución de comunicación y control remoto para dichos dispositivos. Sin embargo, el objetivo principal de poder implementar de forma útil esta comunicación no fue posible al no generar envío de datos por medio de servicios web disponibles en diferentes nubes especializados en soluciones para tecnología embebida, IoT, lo que limito el rendimiento y capacidad de las tecnologías implementadas.

La diferencia más notable respecto a los antiguos dispositivos de automatización como los PLC, es su capacidad para comunicar entornos de IT con los entornos OT, la capacidad de ofrecer información concreta sobre las magnitudes físicas o químicas registradas por un sensor en determinado punto, por ejemplo una máquina que trabaje por muchas horas generara un calentamiento, si colocamos un sensor de temperatura este nos podrá enviar una alerta casi en tiempo real, lo que nos permite tomar ciertas acciones para evitar que la maquina se dañe, así como llevar un registro del funcionamiento de la máquina, tiempo de trabajo, piezas fabricadas y regular el consumo de energía. Dichas herramientas nos dejan saber el estado de todos los dispositivos y permitirá el análisis de los datos tomados por medio de servicios de IT, que nos permiten a su vez acceder a toda una gama de soluciones disponibles como lo son los mantenimientos predictivos, optimización de procesos productivos, ciber seguridad, monitoreo eficiente de la energía y los recursos entre otros.

De acuerdo con los estudios hechos, sobre la problemática, las soluciones actuales son de más nivel con respecto a lo que podría ser abordar estas infra estructuras solo desde una perspectiva de OT, que no tiene en cuenta la gran capacidad de cómputo que ofrecen los servicios TI y la computación embebida.

5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La transformación digital está redefiniendo el panorama industrial global mediante la adopción de tecnologías inteligentes que integran el mundo físico y virtual. Las empresas que no adoptan el modelo de industria 4.0 enfrentan una desventaja competitiva significativa, quedando rezagadas frente a organizaciones que ya han incorporado automatización, interconectividad y análisis de datos en tiempo real en sus procesos productivos.

Según Roland Rosell, la transformación digital implica la adaptación de las cadenas de valor al impacto disruptivo del consumidor digital y a la interconexión de todas las áreas económicas. En este contexto, modelos digitales emergentes están desplazando rápidamente a negocios tradicionales. McKinsey proyecta que el aporte de las grandes corporaciones al PIB mundial disminuirá en un 20% en la próxima década, mientras que países emergentes y en desarrollo generarán un 60% del crecimiento global, impulsados por la digitalización industrial.

La industria manufacturera, en particular, enfrenta el reto de incorporar tecnologías como IoT, sistemas embebidos, CNC, computación en la nube y sensores inteligentes para evolucionar hacia un modelo de producción automatizado, flexible y tolerante a fallos. Sin embargo, muchas empresas aún carecen de una infraestructura adecuada para lograr esta transición.

En este contexto, surge la necesidad de responder a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar una infraestructura IoT que permita la implementación de un modelo de industria inteligente aplicado a máquinas CNC en un entorno industrial tolerante a fallos?

6 OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN BASADO EN IoT DE UN ENTORNO INDUSTRIAL BASADO EN MÁQUINAS CNC PARA EMPRENDIMIENTOS COLOMBIANOS. HACIA LA CALIDAD DE FABRICACIÓN DE PIEZAS MECANIZADAS.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. analizar el estado del arte en referencia a los sistemas de tele gestión y monitorización en el ámbito del control CNC incluyendo sus protocolos de comunicación y enfoques de IoT.
2. identificar las variables susceptibles a monitorización y tele gestión para un ambiente de fabricación de piezas mecanizadas usando CNC.
3. diseñar el sistema de tele gestión y monitorización articulado al ámbito de CNC basado en dispositivos IoT
4. implementar el sistema de tele gestión y monitorización industrial, para el ámbito de CNC.
5. Generar escenarios de pruebas que permitan evidenciar la calidad de fabricación de piezas mecanizadas.
6. analizar los resultados obtenidos del sistema de tele gestión y monitorización implementado para afianzar los procesos de despliegue de los emprendimientos basados en esta técnica de piezas mecanizadas.

7 HIPÓTESIS

La industria está próxima a una gran transformación. El mundo físico y virtual en piensan a fusionarse por medio del área de TI y la comunicación, que trabajan conjuntamente para transformar los procesos industriales para transformar las diferentes áreas de producción.

Este proceso de digitalización de nominado industria 4.0, es promover la automatización de la manufactura. Por medio de tecnologías como lo son los dispositivos embebidos, los sistemas de CNC, IoT, servicios en la nube, entre otros.

Al finalizar este proyecto, se generará una plataforma para conectar y controlar dispositivos CNC, incorporados con tecnología IoT, de manera remota a través de internet integrando diferentes medios de servicios de telegestión, en un contexto de producción de piezas simples.

La plataforma estará pensada para diferentes tipos de usuarios y para generar diferentes alertas gracias a los datos obtenidos por los sensores que serán incorporados a los dispositivos de CNC, de manera que se puedan enviar mensajes de notificación a diferentes usuarios para ayudarlos a corregir errores de producción, permitiendo la supervisión y observación remota.

Así como generar cambios automáticos en los procesos de fabricación en tiempo real, llevar registro de la producción, capacidad de escalabilidad para nuevos dispositivos, una interfaz web que cumpla con los requerimientos necesarios para la entrada de datos en los dispositivos, acceso de usuarios y fácil interacción con las herramientas de control para CNC. Con el propósito de agilizar los procesos industriales y la eliminar la presencia constante de un operatorio.

Tipo de investigación:

cuasi – experimental.

8 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se definen los conceptos claves para el desarrollo de este trabajo de investigación.

8.1 Industria 4.0

La tecnología IoT ha cambiado la forma de administrar la industria y se encuentra direccionando su transformación en lo que se denomina industrias 4.0, este es un modelo de industria inteligente que permite una integración tanto horizontal como vertical, donde todo lo relacionado a obtención de materias primas, productos entre otros que están en contacto con procesos de producción en donde personas y dispositivos involucrados puede notificar eventos, o ser notificados en tiempo real de problemas que puedan o estén presentándose en determinado punto de la línea de producción, estos datos pueden ser almacenados y analizados en tiempo real.

El termino industrias 4.0 o cuarta revolución industrial surgió en Alemania en acuerdo con sus industrias para describir el fenómeno de digitalización de sistemas, procesos industriales, así como de su conectividad a internet lo que le permite mayor flexibilidad, escalabilidad y la posibilidad de integrar múltiples servicios de nube, big data, ciberseguridad lo que da forma a la fábrica inteligente la cual se complementa con el modelo de ciudades inteligente (Smart City).¹

los avances tecnológicos han impulsado aumentos dramáticos en la productividad industrial desde los albores de la revolución industrial de las fábricas de motor a vapor en el siglo XIX, la electrificación condujo a la producción en masa en las primeras partes del siglo XX, y la industria se automatizó en la década de 1970 y en las décadas que siguieron, sin embargo, los avances de la tecnología industrial sólo fueron incrementales, especialmente en comparación con los avances que transformación TI, comunicaciones móviles y e-comerce.

Ahora, sin embargo, estamos en medio de la cuarta oleada de avance tecnológico: el auge de la nueva tecnología industrial digital conocida como Industria 4.0, una transformación que está impulsada por nueve avances tecnológicos fundacionales.

Esta transformación, sensores, máquinas, piezas de trabajo, y el sistema de TI se conectará a lo largo de la cadena de valor más allá de una sola empresa. Estos sistemas conectados (también denominados sistemas ciber físicos) pueden interactuar con otros protocolos basados en estándares de Internet y analizar datos para predecir fallas, configurarse y adaptarse a los cambios. la industria hará posible reunir y analizar datos a través de máquinas, lo que permite trabajar más rápido. procesos más flexibles y eficientes para producir

¹Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Acatech.
<https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strate>

manufacturados de alta calidad a costos reducidos. Esto, a su vez, aumentará la productividad de la manufactura, cambiará la economía, fomentará los crecimientos industriales de las empresas y las regiones.²

8.2 IoT

“Una infraestructura de red global dinámica con capacidades de autoconfiguración basadas en protocolos de comunicación estándar e interoperables donde las cosas físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos, y personalidades virtuales y utilizar la interfaz inteligente, y se integran sin problemas en la red de información, a menudo comunicar los datos asociados con los usuarios y sus entornos.”³

IoT es el resultado de integrar, objetos físicos con microcontroladores a internet. fusionando el mundo físico con el digital y permite la comunicación miles de millones de dispositivos y objetos con tecnología embebida a través de Internet, cuyos datos son recabados, almacenados y analizados por servicios en la nube, que integran múltiples servicios como inteligencias artificiales, ciberseguridad, BlockChain, computación en la nube, Big Data y Analytics.

8.3 Bloques fundamentales de la industria 4.0

8.3.1 Fabricación aditiva

Las compañías empiezan a adoptar la fabricación aditiva, por ejemplo, la impresión 3D, la cual se usa principalmente para crear prototipos y producir componentes individuales. Con la industria 4.0 estos métodos de fabricación aditiva sean ampliamente usados para producir pequeños lotes de productos personalizados que ofrecen ventajas de construcción, como son los diseños ligeros y complejos. Los sistemas de fabricación aditiva descentralizados, de alto rendimiento, reducirán las distancias de transporte y el stock de productos.

8.3.2 Realidad aumentada

Los sistemas basados en realidad aumentada soportan una gran variedad de servicios, como por ejemplo la selección de piezas en un almacén y el envío de instrucciones de reparación a través de dispositivos móviles. Estos sistemas en el ámbito del CNC han venido evolucionando y proporcionaran a los trabajadores información en tiempo real con el objetivo de mejorar la toma de decisiones u los procedimientos de trabajo. Por ejemplo, los trabajadores podrían recibir instrucciones de como sustituir una pieza en particular mientras están mirando el

²Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. The Boston Consulting Group. https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries

³Bahga, A., & Madiseti, V. (2014). *Internet of Things: A hands-on approach*. Universities Press.

propio sistema bajo reparación, a través de unas gafas de realidad aumentada. Otra aplicación podría ser la formación de trabajadores en forma virtual.

8.3.3 Big Data y Analytics

El análisis de grandes cantidades de datos ha surgido recientemente en el mundo industrial, permitiendo optimizar la calidad de la producción, ahorrar energía y mejorar el equipamiento. En la industria 4.0, la obtención y exhaustiva evaluación de datos procedente de numerosas fuentes distintas (equipos y sistemas de producción, sistemas de gestión de clientes.) se convertirá en norma para el apoyo en la toma de decisiones en tiempo real.⁴

⁴Eurofound. <https://www.eurofound.europa.eu/publications/report/2018/future-of-manufacturing-game-changing-technologies>

9 MARCO TEÓRICO

9.1 DISPOSITIVOS CNC

Desde la revolución industrial en 1770, las máquinas eran operadas por usuarios, con el descubrimiento de nuevas fuentes de energías como el vapor, la electricidad y nuevos materiales están tienden cada vez más a la automatización.

En 1945 a finales de la segunda guerra mundial, gracias al desarrollo de materiales como el metal pesado y el tungsteno, así como la invención y desarrollo de la computadora electrónica como sistemas de control mecánicos nace el concepto de control numérico, gracias a la rápida evolución de la computadora está en la época de los 60' es altamente implementada en el área industrial y de control de los sistemas mecánicos.

Desde el desarrollo de las primeras válvulas al vacío, transistores, relés, circuitos integrados, microcontroladores y microprocesadores. La industria ha adoptado todos estos avances tecnológicos y de los sistemas electrónicos, para mejorar la producción, precisión y para mejorar la eficiencia en el sector industrial, así como reducir costos.

En los años 60' nace el control numérico por ordenador, con funciones en memoria que cumplían diferentes propósitos y podían ser reprogramados, pero aun los ordenadores tenían un tamaño físico muy grande, una capacidad limitada y un costo muy grande.

Gracias a los avances de los micro controladores, sistemas mecánicos, de materiales y la evolución de los microprocesadores y de sus funciones como capacidades de cómputo, sistemas operativos y bajo costo es posible implementar estos aparatos como se ha hecho a través de la historia industrial, ahora gracias al internet y todas las facilidades de comunicación es posible el control de estos sistemas en tiempo real y casi total a través de ellos, es decir que podemos generar sistemas mecánicos autónomos y prácticamente independientes de la supervisión.

IoT administra y controla dispositivos de forma remota y no requiere que los dispositivos en lugares fijos donde como en un modelo de industria centralizado, sino que podemos hacerlo en cualquier lugar, cargar un programa o un archivo a la programación o software de control de la máquina y generar una operación a través de servicios en la nube, así como regular las demás funciones en cualquier momento, corrigiendo errores , generando mantenimiento preventivo, requiriendo solo pausas para efectuar procedimientos de mantenimiento de los sistemas y dispositivos.

Los dispositivos CNC conectados a IoT posibilitan múltiples oportunidades de negocio a un por innovar cambiando la forma de fabricar piezas diseñados por computadora y luego impresas o fabricadas de forma más eficiente y con mejor calidad en las terminaciones. Los diseños pueden ser fácilmente ajustados y simulados antes de su producción.

En la actualidad los dispositivos CNC dispones de gran cantidad de código y software libre (open source), que puede ser adaptado para el control y operación de distintos dispositivos CNC con características mecánicas y físicas diferentes. Los dispositivos CNC conectados a

una red IoT no necesitan de supervisión, pueden ser controlados remotamente y hacen mejor uso de los recursos materiales y energéticos.⁵

9.2 SENSORES

Los pulsadores e interruptores son probablemente los sensores más simples, permiten solo entradas de señal al usuario. Potenciómetros (tanto rotativos como lineales) y permiten medir el movimiento rotatorio.

percibir el ambiente es otra opción fácil. Las resistencias dependientes de luz (LDRs) permiten la medición de los niveles de luz en el ambiente, temperatura y otras medidas de humedad o niveles de humedad y son fáciles de implementar.

Los micrófonos evidentemente le permiten monitorear el sonido y el audio, pero los elementos piezoeléctricos (utilizados en ciertos tipos de micrófonos) también se pueden utilizar para responder a la vibración.

Los módulos de detección de distancia, que funcionan al rebotar una señal infrarroja o ultrasónica con un objeto, están disponibles y son tan fáciles de implementar como un potenciómetro.⁶

⁵López López, Á. A., & Parra Santos, P. R. (2016). *Diseño de una fresadora router CNC* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

⁶McEwen, A., & Cassimally, H. (2014). *Designing the Internet of Things*. Wiley.

10 ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente proyecto tiene como alcance el diseño e implementación de un sistema de tele gestión orientado al control remoto y monitoreo en tiempo real de procesos de mecanizado en máquinas CNC, incluyendo funcionalidades básicas como el registro seguro de usuarios, la supervisión del estado de las máquinas, y el control remoto de parámetros operativos mediante una interfaz web accesible desde cualquier dispositivo con conexión a Internet. Las pruebas del sistema se realizaron en un entorno simulado que representa condiciones típicas de un taller industrial, permitiendo validar su funcionamiento en escenarios representativos sin necesidad de desplegarlo en un entorno productivo real.

Dentro de las limitaciones del proyecto se identifican la no integración con sensores avanzados ni redes de monitoreo complejas, así como la exclusión de algoritmos de inteligencia artificial para optimización autónoma. Tampoco se abordaron aspectos de escalabilidad o adaptación a una infraestructura de Industria 4.0. Estas restricciones responden al alcance acotado del trabajo y a la complejidad técnica que implican dichas integraciones. A pesar de ello, el sistema desarrollado constituye una base funcional y práctica que puede evolucionar hacia soluciones más robustas en futuros desarrollos.

11 METODOLOGÍA

Este trabajo de grado sigue el método científico concretamente el método hipotético-deductivo, empleando la hipótesis aquí propuesta.

Por consiguiente, se desarrollará sobre los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Análisis el estado del arte en referencia a los sistemas de tele gestión y monitorización en el ámbito del control CNC incluyendo sus protocolos de comunicación y enfoques de IoT.

Capítulo 2. Identificación las variables susceptibles a monitorización y tele gestión para un ambiente de fabricación de piezas mecanizadas usando CNC.

Capítulo 3. Diseño del sistema de telegestión y monitorización articulado al ámbito de CNC basado en dispositivos IoT

Capítulo 4. Implementación del sistema de tele gestión y monitorización industrial, para el ámbito de CNC.

Capítulo 5. Generación escenarios de pruebas que permitan evidenciar la calidad de fabricación de piezas mecanizadas.

Capítulo 6. Análisis los resultados obtenidos del sistema de tele gestión y monitorización implementado para afianzar los procesos de despliegue de los emprendimientos basados en esta técnica de piezas mecanizadas.

Luego se concluye y se plantean los trabajos futuros.

12 RECURSOS

Equipos:

- Dispositivos CNC.
- Miniordenadores.
- Drivers y Microcontroladores.
- Dispositivos de comunicación.
- Sensores.

Software:

- Sistema operativo.
- Aplicaciones y software.
- Servicios de nube.
- Servicios de hosting.
- Servíós de proveedores de red.

Activos:

Se cuenta con gran número de dispositivos, parte casi total del Hardware, un servicio de almacenamiento y el software implementado es de su totalidad de código abierto y libre por lo que no acarrea costos. También se cuenta con un lugar donde estarán los dispositivos. A continuación se presenta la tabla (ver Tabla 1), que expone los recursos financieros utilizados.

Tabla 1. Rubros.

rubros		financiado		toal
equipos		\$ 10.000.000		\$ 10.000.000
servicios Web		\$ 1.000.000		\$ 1.000.000
valor total				\$ 11.000.000

Fuente: Elaboración propia.

13 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE EN REFERENCIA A LOS SISTEMAS DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN EN EL ÁMBITO DEL CONTROL CNC INCLUYENDO SUS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y ENFOQUES DE IOT.

Para el desarrollo de objetivo se llevó a cabo una investigación exhaustiva sobre las tecnologías de control remoto e inteligente para sistemas CNC. El enfoque principal fue explorar las soluciones más avanzadas que ofrecen las grandes empresas manufactureras de máquinas CNC, especialmente aquellas orientadas al control remoto a través de Internet y sistemas IoT. Aunque la tecnología CNC ha avanzado notablemente, las soluciones de tele gestión siguen siendo limitadas y costosas, accesibles principalmente a grandes industrias como la automotriz y aeroespacial. Adicionalmente, se identificaron aplicaciones en sectores como la fabricación de repuestos y el diseño industrial.

Este capítulo tiene como fin analizar el estado del arte, por ello, en primer lugar, se aborda el contexto del CNC a nivel general, en segundo lugar, se aborda el mercado internacional del CNC, en tercer lugar se aborda el contexto colombiano del CNC, en cuarto lugar se analizan los sistemas de telegestión, en quinto lugar se aborda el escenario relacionado con las máquinas de fresado de tres ejes (usando código G). Posteriormente se concluye parcialmente.

13.1 Contexto CNC

Muchas de las cosas que existen en el mundo son gracias a las maquinas CNC, desde simples utensilios a piezas complejas para motores o micrométricas piezas para dispositivos electrónicos y de uso aeroespacial. las máquinas de CNC producen partes y componentes con una velocidad, exactitud y precisión que serían imposibles de producir de forma manual.

las industrias que involucran máquinas de CNC reducen costos y tiempos en los procesos de fabricación y son fundamentales para las industrias de los países desarrollados. además de brindar una fabricación de alta calidad y de alto valor añadido, que de no ser adoptado por las industrias manufactureras se verán en desventaja competitiva en el futuro.⁷

Los dispositivos de control numérico por computadora (CNC) se utilizan para fabricar diversos componentes complejos. Hay varios tipos de máquinas CNC para satisfacer las demandas industriales. Fresado, corte por plasma, impresoras 3D de inyección, SLA y DLP. Son algunas de las maquinas CNC de uso común. Con el advenimiento de la cuarta revolución industrial o industria 4.0, la adopción de sensores y software en las maquinas industriales ha aumentado. Asu vez, varios casos de uso en todas las industrias han llevado a una mayor productividad, productos de mayor calidad y costos reducidos.

La máquina CNC habilitada para IoT está ganando atracción rápidamente entre los fabricantes, ya que ayuda en el monitoreo remoto, el análisis predictivo y el mantenimiento.

⁷ Machado, F. X. B. G. (2022). *Improvement of a CNC automation approach in AFM* [Tesis de maestría, Universidade de Coimbra]. Estudo Geral. <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/96834>

Las empresas comprometidas se están centrando en la innovación de productos para crear presencia de marca y garantizar el sustento del mercado a largo plazo.⁸

IoT es el motor de industrias 4.0 y la cuarta revolución industrial, y permite la conexión de los miles de millones de objetos inteligentes (electrodomésticos, relojes, pulseras, gafas...) existentes en la actualidad, y los muchos que se prevén para los próximos años. La conectividad global aumentara gracias a los objetos inteligentes (mediante sensores, etiquetas RFID, NFC...) con la posibilidad de conectarse entre ellos a través de Internet.⁹

En la actualidad disponemos de varias alternativas de adquirir tecnología CNC, una es adquirirla como un producto completo o de uso específico para determinada industria. Dependiendo la capacidad de procesamiento sobre las herramientas de software, complejidad mecánica, número de ejes, potencia, formato, versatilidad y calidad en los terminados, así como otras variables afectaran directamente el valor del estas que de entrada puede ser muy alto en aplicaciones de tipo industrial. para las pequeñas pymes que podrían beneficiarse y transformar su modelo de negocio a un escenario digital a partir del uso de esta tecnología.¹⁰

Afortunadamente en este caso gracias a un libre comercio de piezas, mecánicas, electrónica, microcontroladores y disponibilidad de código libre para estos mismos, así como de herramientas de software para el control de los dispositivos, la tecnología ya no es exclusiva en gran parte de las grandes corporaciones que han comercializado esta tecnología en su mayoría para las industrias automotrices desde los años 1970. En la web podemos encontrar mucha información y soluciones para que podamos apropiarnos de esta tecnología de una forma más económica e incluso fabricar los dispositivos a partir de herramientas y soluciones mecánicas simples pero efectivas de las que nos podemos valer en casi cualquier taller debido a la alta disponibilidad de las herramientas y piezas empleadas que son comercializadas en casi todas las partes del mundo con las que podemos fabricar CNC de forma cacara.¹¹

Por esta misma razón se ha formado un comercio de dispositivos CNC más económicos o de costo medio para las diferentes soluciones de fabricación, como puede ser el corte por láser, fresado e impresión 3D. Esta última puede llegar a ser la forma más popular y practica de utilizar la tecnología CNC dentro de un contexto de industria aditiva. Aun así, estos sistemas pueden llegar a tener un grado de dificultad, para el usuario que no está familiarizado con el funcionamiento de estos sistemas y que desea poder beneficiarse de la fabricación por CNC de forma rápida y fácil.

⁸ Bekryl Market Analysts. (2022). *IoT enabled CNC systems market size – Analysis and forecast*. <https://bekryl.com/industry-trends/iot-enabled-cnc-systems-market-size-analysis>

⁹ Aguilar, L. J. (2019). *Industrias 4.0*. Alfaomega.

¹⁰ Haas Automation, Inc. (2023). *Lista de precios de productos*. <https://www.haascnc.com/es/shop/category/pricelist.html>

¹¹ Hood-Daniel, P., & Kelly, J. F. (2022). *Build your own CNC machine*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2490-7>

Esto se debe a la falta de sistemas que den alerta y software complementario de control en estos dispositivos, lo que los hace poco prácticos y sujetos a efectuar operaciones que pueden llevar a la máquina a errores de mecanizado sobre las piezas de trabajo y partes físicas de la máquina, ocasionando daños y posibles accidentes. A pesar de esto podemos seguir trabajando desde su construcción para generar sistemas que suplan esta necesidad de facilitar el manejo, operación y control de estos dispositivos. Integrando a la máquina herramienta sistemas de sensores y de transmisión de datos que permitan saber el estado de la máquina para poder generar una imagen virtual de esta, dándoles capacidad suficiente para que puedan aprovecharse de las tecnologías avanzadas como se pretende con el desarrollo de esta tesis posibilitando el futuro uso de tecnologías disponibles y contribuir al desarrollo de la misma, con la intención de monitorizar, predecir, generar estadística y observaciones de utilidad, de forma que a través de la evaluación de estas se puedan crear estrategias dirigidas a optimizar los diferentes procesos de fabricación y comunicación permanente en tiempo real de la disponibilidad y estado de la máquina, así como poder ejercer control y visualización de estos, con veras a que se puedan habilitar otras funciones disponibles en la nube u otros servicios web para poder brindar compatibilidad y permitir el futuro uso de tecnologías como IA y ML que ayudan a mejorar los procesos de fabricación y la calidad de los productos.¹²

De manera que hoy tenemos diversas formas para acceder a esta tecnología, las cuales revisaremos rápidamente con el fin de poder seleccionar los elementos de sistema suficientes para la conformación plataforma web de control y administración para dispositivos CNC, como el tipo de máquina herramienta, infraestructura de red, protocolos, requerimientos de software tanto como de hardware necesarios para implementar el sistema de monitoreo y telegestión en la máquina herramienta CNC.

13.2 Mercado Internacional que involucra CNC.

El concepto de CNC ha experimentado una evolución significativa en paralelo con los avances en diversas disciplinas tecnológicas y científicas. La capacidad de automatizar procesos de mecanizado ha impulsado la eficiencia y la precisión en la fabricación de piezas y productos en una amplia variedad de industrias. A lo largo de los años, varias compañías se han destacado como pioneras en la fabricación, financiación y desarrollo de estas tecnologías, reconociendo la importancia de la ampliación de CNC en la industria moderna.

A continuación, se mencionarán algunas de las empresas más relevantes en la industria del CNC.

13.2.1 Mazak

Desde 1968, Mazak Corporación ha desempeñado un papel en la industria manufacturera

¹² Taridala, S., Yudono, A., Ramli, M. I., & Akil, A. (2017). Expert system development for urban fire hazard assessment: Study case: Kendari City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 79, 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/79/1/012035>

estadunidense. Primero en Long Island y a, partir de 1974, en su sede en Florence, Kentucky. Mazak ha liderado la creación de la Mazak iSMART Factory TM, que modela las técnicas de fabricación más avanzadas del mundo. Ofrece soluciones de mecanizado para una amplia gama de industrias, desde la aeroespacial hasta la electrónica médica y de consumo, así como la construcción.

Sus innovaciones tecnológicas incluyen una amplia gama de centros de mecanizado verticales y horizontales, así como tornos, y maquinas más avanzadas. Ofrecen niveles de mecanizado multitarea que van desde tornos con torretas de fresado estilos tambor hasta centros de mecanizado multitarea simultanea de 5 ejes, junto con máquinas híbridas que combinan técnicas de adición y sustracción de materiales.

Para ayudar a los clientes a mantenerse competitivos en un mundo donde la fabricación requiere que maquinas funciones 24 horas al día, todos los días, Mazak también se esfuerza por ofrecer al máximo apoyo. Además, su enfoque en la automatización y las herramientas digitales les permite integrar sus máquinas con soluciones digitales, como el Internet de las Cosas.

Mazak es una empresa líder en el desarrollo y producción de tecnologías de mecanizado y se destaca con la innovación y conectividad digital en la industria manufacturera, lo que incluye la adopción del IIoT.

La Misión de Mazak se centra en tres áreas claves, clientes de valor, los socios y la comunidad global. Para los clientes Mazak se compromete a proporcionar soluciones líderes en la industria para la fabricación avanzada que mejore la productividad a través de diseños de máquinas creativos, software, herramientas, accesorios y automatización, combinados con aplicaciones y servicios integrales. En el caso de los asociados de Mazak la empresa se esforzará por crear un entorno de trabajo seguro, gratificante y enriquecedor para sus empleados y sus familias. Y el ultimo enfoque dirigido a la comunidad global, Mazak se esforzará por ser un buen ciudadano corporativo y promover un comportamiento responsable, el respeto por el medio ambiente y relaciones positivas con las comunidades en las que opera. Mazak se dedica a proporcionar soluciones tecnológicas innovadoras líderes en la industria y apoyar a la comunidad global de fabricación, al tiempo que ofrece un entorno seguro y enriquecedor para sus empleados y aboga por prácticas comerciales responsables. (Mazak Corporation, 2023).

13.2.2 Haas Automation

Se considera el principal fabricante de máquinas herramienta en occidente, se destaca por su gama completa de centros de mecanizado vertical, centros de mecanizado horizontal, tornos CNC y mesas rotativas. Fundada en 1983 por Gene Haas, la empresa se centró en fabricar maquinas herramientas económicas y fiables. Introdujo el innovador divisor de pinza programable y completamente automático, que revoluciono la precisión en el mecanizado.

En 1987, Haas Automation lanzó su primer centro de mecanizado vertical, el VF-1, que sorprendió a la industria con su precio competitivo y un rendimiento inigualable. A pesar de la duda inicial de que una máquina fabricada en EE. UU. pudiera ofrecer tal relación calidad-precio, la Hass VF-1 supero todas las expectativas.

Haas se enorgullece de fabricar todos los componentes principales en su fábrica de 102.000

metros cuadrados, utilizando las últimas tecnologías CNC para garantizar la precisión y optimizar la producción. Más del 65% de las máquinas en la fábrica son de la marca Haas. Esta inversión constante en maquinaria nueva aumenta la capacidad de producción y reduce costos, lo que beneficia a los clientes con precios competitivos y productos de alta calidad.

Actualmente, Haas ofrece cuatro líneas de producción principales, incluyendo centros de mecanizado vertical, centros de mecanizados horizontal, tornos CNC y mesas rotativas, junto con máquinas de cinco ejes y equipos especiales. Todos estos productos se fabrican en su avanzada planta en Oxnard, California, que es la planta de producción de máquinas herramienta más grande y moderna en los Estados Unidos. Haas Automation sigue siendo una fuerza líder en la industria de máquinas herramienta. (Haas Automation, Inc., 2023).

13.2.3 DMG Mori

DMG Mori ofrece un portafolio versátil de máquinas CNC, lo que permite a los clientes encontrar soluciones de producción eficientes y personalizadas. Sus sistemas de control CNC modernos simplifican la programación y la operación, haciendo que el proceso de mecanizado sea más accesible. La empresa se destaca por abarcar todas las tecnologías clave de la industria de máquinas CNC, ofreciendo una amplia variedad de opciones para satisfacer las necesidades de fabricantes de todo tipo.

DMG Mori, ofrece máquinas CNC de fresado, corte por ultrasonido, corte laser, y fabricación aditiva como SLM (fusión láser en polvo), DED (deposición de material en polvo) y procesos híbridos que combinan mecanizado y tecnologías generativas.

DMG Mori, también destaca por su tecnología en de rectificado, adquirida a través de la adquisición de TAIYO KOKI hace 20 años. Por lo que ofrece máquinas de rectificado horizontal, vertical y rotativas de diversos tamaños.

DMG integra procesos y automatización aprovechando su experiencia en estas áreas para brindar soluciones de fabricación cada vez más productivas. Esto implica una integración exhaustiva de los procesos de fabricación, lo que permite realizar torneado, fresado y rectificado en una sola configuración de la pieza de trabajo. Esta integración agiliza significativamente la producción y reduce la necesidad de cambios manuales herramientas y reajustes.

Además, DMG MORI va más allá al ofrecer soluciones de automatización flexible que se traducen en una mejora sustancial en la productividad y la eficiencia de la producción. Esto se logra mediante la implementación de sistemas de manipulación de piezas y palets que permiten una gestión fluida de las piezas en el proceso de mecanizado. Además, la introducción de introducción de productos asistidos por robots agrega un nivel adicional de automatización y versatilidad a las operaciones de inactividad, lo que a su vez se traduce en una producción, más eficiente y rentable. (DMG MORI, 2023)

13.2.4 Siemens

Siemens es una empresa líder en tecnologías con una amplia experiencia y reconocimiento

en el campo de control numérico por computadora (CNC). Su producto estrella para CNC es el sistema SINUMERIK, que abarca una amplia gama de tecnologías de mecanizado y automatización para la fábrica de piezas y componentes.

SINUMERIK se destaca por ser un sistema multi tecnológico CNC, lo que significa que puede abordar múltiples tecnologías, incluyendo torneado, fresado, perforación, rectificado, y también técnicas avanzadas como el mecanizado de superficies libres y la fabricación aditiva. Esto hace que SINUMERIK se a una solución versátil que satisface las necesidades de fabricación en diversas industrias.

Una característica distintiva de SINUMERIK es su capacidad para integrar una amplia variedad de tecnologías en una sola máquina, lo que se traduce en una eficiencia significativa en la producción. Desde el torneado y fresado hasta la adición de robots CNC para tareas de mecanizado, SINUMERIK facilita la creación de soluciones de mecanizado avanzadas que pueden abordar una amplia variedad de aplicaciones.

La plataforma de SINUMERIK también se adapta a la fabricación del futuro, con la capacidad de integración técnicas de fabricación aditiva y la utilización de robots CNC para tareas de mecanizado. Esto permite a las empresas de mecanizado ampliar su espectro de producción y enfrentar los desafíos de la fabricación moderna.

Siemens a través de su plataforma NUMERIK se encuentra en la vanguardia de la tecnología CNC, ofreciendo soluciones completas y flexibles que satisfacen las necesidades de fabricantes en constante evolución. Sus capacidades de integración y su enfoque en la eficiencia de producción hacen que Siemens sea una elección sólida para empresas que buscan avanzar en la fabricación y los nuevos desafíos del futuro industrial, vale la pena agregar que siemens es una empresa que colabora de forma directa con DMG Moris. Fundada en octubre de 1847 en Berlín, Reino de Prusia. Siemens en una empresa líder mundial en tecnología, ingeniería y sus servicios abarcan una amplia gama de sectores, desde, la electrificación y automatización industrial hasta la atención médica y la infraestructura sostenible y ha desempeñado un papel esencial en el avance tecnológico y el desarrollo económico en todo el mundo.

13.2.5 Beijing Jingdiao CO., Ltd.

Beijing Jingdiao Co, es una empresa líder en la industria del CNC que se destaca por su innovación y calidad en el ámbito del mecanizado de precisión. A nivel general, la empresa ha desarrollado el sistema CNC JD50, una solución de código abierto que cumple con los estándares de la industria y es altamente compatible con otros sistemas CNC convencionales. Este sistema se basa en una estructura PC-Based y utiliza un ordenador personal industrial (IPC) con el sistema operativo Windows XP Embedded. Además, emplea el software CNC En3D, lo que lo hace especialmente adecuado para especializaciones de mecanizado de alta precisión. Beijing Jingdiao Co. Ltd. Se enorgullece de ofrecer tecnología avanzada en operaciones de múltiples ejes, medición en line y visión artificial, estableciendo un estándar un estándar destacado en la industria del CNC en China.

En lo que respecta a los servicios de CNC, la empresa se especializa en una amplia gama de áreas. Su Sistema CNC JD50 ofrece una serie de capacidades esenciales, como el soporte de módulos de medición, la integración de equipos automáticos, funciones de compensación

avanzada y mecanización de múltiples ejes. Además, Beijing Jingdiao Co., Ltd. Se destaca en la gestión eficiente de la vida útil de las herramientas, lo que contribuye significativamente a la automatización en procesos de fabricación en lotes. La empresa también brinda una sólida gestión de autorización que respalda un sistema jerárquico de gestión de la producción en fábricas. Con un enfoque en la innovación y la tecnología avanzada, Jingdiao se ha convertido en un referente en la industria del CNC y el mecanizado de precisión en China y más allá. Su compromiso con la calidad y la excelencia ha posicionado a la empresa como líder en la industria del CNC, así como su capacidad para producir equipos de alta calidad a precios competitivos ha contribuido a su éxito en este sector. (Beijining Jingdiao Group Co., 2023).

Las empresas en el ámbito de la fabricación de máquinas CNC a nivel internacional son fundamentales para la industria de la maquinaria y la automatización en todo el mundo. Estas compañías se dedican a la producción de una amplia variedad de equipos CNC, incluyendo centros de mecanizado, tornos, fresadoras y sistemas de control. Su contribución a la industria es de gran relevancia, y su presencia global es una señal de la demanda continua de tecnología CNC de alta precisión.

Estas empresas compiten en un mercado global altamente competitivo, y su éxito se basa en la calidad de sus productos, la innovación constante y la capacidad de adaptación a las necesidades cambiantes de los clientes. Además, desempeñan un papel fundamental en el desarrollo tecnológico al impulsar avances en el mecanizado de precisión, la automatización y eficiencia en la producción industrial. En conclusión, las empresas internacionales en este sector son pilares clave en la fabricación de máquinas CNC a nivel mundial, y su continuo desarrollo y mejora tecnológica tiene un impacto significativo en una amplia gama de industrias, desde la automotriz hasta la aeroespacial y electrónica.

13.3 Mercado Colombiano que involucra CNC.

Aunque en Colombia se producen máquinas CNC, estas no suelen alcanzar la misma capacidad tecnológica que las que encontramos en otros países desarrollados. Esto se debe a que los países altamente industrializados han invertido significativamente en investigación y desarrollo en el campo de la maquinaria CNC, lo que les ha permitido estar a la vanguardia en términos de innovación y tecnología. A pesar de esto, Colombia ha avanzado en la adopción de la tecnología CNC y la producción de máquinas CNC de alta calidad en comparación con años anteriores. La inversión en formación técnica y la importación de tecnología de vanguardia contribuyen a elevar gradualmente el nivel tecnológico del país en este campo, impulsando así la competitividad y capacidad de producción en la historia.

En Colombia, el empleo de CNC es muy diverso se ha extendido a una variedad de sectores e industrias. A continuación, se describen algunas de las formas en que se utiliza el CNC en el País

13.3.1 Mecanizado de Precisión.

El CNC se utiliza en la industria metalmecánica para la producción de componentes y piezas de alta precisión. Esto abarca la fabricación de piezas para la industria automotriz, aeroespacial, energética y maquinaria industrial, entre otras.

13.3.2 Moldes y Troqueles.

El mecanizado CNC se emplea en la creación de moldes y troqueles utilizados en la producción de piezas de plástico y metal, lo que es relevante para la industria manufacturera.

13.3.3 Carpintería y Mobiliario.

En la industria de la carpintería y fabricación de muebles, el CNC se utiliza para cortar y esculpir madera con gran precisión, lo que permite la creación de diseños personalizados y detallados.

13.3.4 Electrónica y Tecnología.

Se utiliza en la fabricación de placas de circuitos impresos (PCB) para dispositivos electrónicos y tecnologías, asegurando la precisión y calidad en la producción.

13.3.5 Industria de la Piedra.

En la producción de monumentos funerarios, encimeras de cocina y productos de piedra, el CNC se utiliza para esculpir y dar forma a la piedra de manera precisa y eficiente.

13.3.6 Educación y Formación Técnica.

Las instituciones educativas y centros de formación técnica utilizan maquinas CNC para capacitar a futuros operadores y programadores, preparándolos para una variedad de industrias.

13.3.7 Dispositivos Médicos.

En la industria de dispositivos médicos, el CNC se utiliza para producir piezas de alta precisión y calidad utilizadas en equipos médicos y dispositivos de laboratorio.

13.3.8 Automatización Industrial.

En general, el CNC se integra en sistemas de automatización industrial para controlar máquinas y procesos en una amplia gama de aplicaciones de producción y fabricación.

En Colombia se utiliza CNC en múltiples sectores y aplicaciones, permitiendo un mecanizado de alta precisión y una mayor eficiencia en la producción. Ha contribuido significativamente al desarrollo tecnológico y lo competitividad de la industria colombiana en el ámbito nacional e internacional.

13.4 Sistemas de Telegestión en CNC

Es imperativo reconocer que en el ámbito del diseño y la implementación del CNC, día tras día se orienta hacia desplegar sistemas de telegestión de máquinas CNC.

Para comenzar, se examinará con detenimiento la trascendencia de la telegestión en el control de máquinas CNC de fresado horizontal de 3 ejes para aplicaciones de grabado y corte en madera (*se enfatiza en este material por los propósitos que sigue esta investigación*). Por lo anterior, se analizaron en profundidad los beneficios de la telegestión, con énfasis en la supervisión y control remoto, así como en el aumento de la eficiencia y productividad de los procesos de manufactura en madera.

En marco de lo anterior, se buscará establecer de manera clara y precisa la relación existente entre la plataforma de telegestión en desarrollo, las maquinas CNC de fresado horizontal de

3 ejes, las operaciones de grabado y corte en madera, y la creación de un entorno propicio para una aplicación efectiva. Estas relaciones se basarán en la comprensión de las características específicas de las máquinas CNC y la versatilidad de la plataforma de telegestión.

Finalmente, se llevarán a cabo un análisis minucioso de las distintas soluciones de telegestión disponibles y su adaptabilidad a las máquinas CNC de fresado horizontal de 3 ejes para aplicaciones de grabado y corte en madera. Este análisis servirá como punto de partida para el desarrollo de la plataforma de telegestión funcional y uniforme que satisfaga las necesidades de esta aplicación especializada.

En coherencia con lo consultado a lo largo del estado del arte del escenario de Telegestión en CNC se requiere seguir las siguientes etapas:

13.4.1 Diseño de la plataforma.

En esta etapa, se definen la arquitectura de la plataforma, se crea una interfaz de usuario amigable y se establecen medidas de seguridad cibernética. Además, se seleccionan las tecnologías de conectividad que permitirán una interacción eficiente entre la plataforma y las máquinas CNC.

13.4.2 Desarrollo de Software.

En el desarrollo de software, se crean aplicaciones específicas que permiten la comunicación con las máquinas CNC, la programación de tareas, la visualización de datos en tiempo real y el control remoto. Se definen protocolos de comunicación sólidos y se planifica la gestión de tareas, así como la forma en que los datos se presentarán a los usuarios. Además, se establecen mecanismos para las actualizaciones de software y el mantenimiento continuo, garantizando el funcionamiento óptimo de la plataforma.

13.4.3 Integración de Sensores.

Los sensores seleccionados miden aspectos críticos en las máquinas CNC, como la temperatura, la velocidad, la posición y la calidad del corte. La correcta conexión y calibración de estos sensores son tareas fundamentales para asegurar mediciones precisas.

13.4.4 Pruebas y Validación.

Las pruebas y validaciones son cruciales para asegurarse de que la plataforma funcione de manera confiable y cumpla con sus objetivos. Esto implica pruebas exhaustivas en entornos de laboratorio y pruebas en máquinas CNC reales en escenarios de producción para evaluar su eficiencia y confiabilidad. La retroalimentación de los usuarios finales es esencial para identificar posibles mejoras y ajustes necesarios.

13.4.5 Implementación y Escalabilidad.

La implementación en las máquinas CNC y la escalabilidad de la plataforma son etapas clave para llevar la telegestión a un entorno de producción real y asegurar que la plataforma pueda adaptarse a futuras expansiones. También se planifica el mantenimiento en óptimas condiciones y garantizar su funcionamiento continuo y seguro. Este enfoque metódico y completo es esencial en el desarrollo y despliegue de la plataforma de telegestión en el contexto de grabado y corte en madera con máquinas CNC de fresado horizontal de tres ejes.

13.5 Máquinas CNC de Fresado de Tres Ejes: Funcionamiento Integrado con Código G en el Contexto de Pequeñas Empresas

En el contexto de la manufactura, las máquinas CNC de Fresado en Tres Ejes destacan por su papel práctico y eficiencia, especialmente en la fabricación de piezas mediante técnicas de sustracción de material por fresado. Este capítulo se enfoca en describir detalladamente el funcionamiento intrínseco de estas máquinas, destacando su interacción con el código G y los procesos de mecanizado.

Desde la conceptualización hasta la implementación práctica, se explora como estas máquinas, gracias a su accesibilidad y popularidad, se han convertido en elementos clave para optimizar la eficiencia y productividad en entornos empresariales de producción de piezas de diseño a partir de archivos generados por software de diseño CAD, capases de general G code, para diferentes tipos de dispositivos de tipo CNC, en nuestro caso específico un dispositivo CNC de fresado horizontal basado en tres ejes de movimiento X, Y y Z.

A lo largo de este análisis, exploraremos cómo estas máquinas se han vuelto elementos cruciales para mejorar la eficiencia y productividad en entornos empresariales dedicados a la producción de piezas diseñadas mediante software CAD y generación de código G.

A continuación, profundizaremos en los detalles específicos de su funcionamiento e integración con el código G en el contexto de un dispositivo CNC de fresado horizontal con tres ejes de movimiento.

13.6 Máquinas CNC de Fresado en Pequeñas Industrias

Las máquinas CNC de fresado se destacan como protagonistas esenciales en la manufactura al esculpir con precisión piezas mediante la eliminación de material mediante cortes sobre diversos sustratos. Administradas por medio de una computadora, estas herramientas son programadas a través de código G que delinean la ruta de la herramienta y las operaciones específicas de fresado. Este proceso implica una estrecha colaboración con software de diseño asistido por computadora (CAD), donde modelos tridimensionales toman forma antes de generar las instrucciones de mecanizado en G code o instrucción es de mecanizado CNC.

En entornos de pequeñas industrias, es común encontrarse con CNC que emplean GRBL, un intérprete de código G, para la elaboración precisa de piezas. GRBL, no solo proporciona una solución accesible y eficiente para el control de máquinas CNC en entornos más reducidos, sino que también habilita movimientos coordinados de alta precisión. Esto empodera a los operadores para llevar a cabo procesos de fresado detallados y complejos. La integración de GRBL en máquinas CNC de fresado simplifica la programación, mejora la eficiencia operativa y la versatilidad en la producción de piezas personalizadas. La combinación de las tecnologías CNC y GRBL, destacan por facilitar la adaptabilidad de estos sistemas en entornos industriales más compactos, proporcionando una solución efectiva para la fabricación preciso y ágil de componentes.

13.7 Tolerancia a Fallos en Sistemas de Telegestión para Máquinas CNC

La tolerancia a fallos en sistemas de telegestión IoT para entornos industriales con máquinas CNC es una propiedad crítica que permite mantener la operación continua ante fallos de hardware, software o red. En el contexto de una solución de monitoreo remoto, la cual se

asocia a esta investigación , esto implica la capacidad de detectar fallas (por ejemplo, pérdida de conexión, errores en sensores o comandos incompletos) y responder automáticamente sin comprometer la integridad del proceso de fabricación.

Entre las estrategias más comunes se encuentran el uso de *watchdogs*, mecanismos de *retry* con lógica de reintentos, buffers locales en Gateways para evitar pérdida de datos en caso de desconexión, y la implementación de redundancia en la infraestructura. Asimismo, es importante determinar cuál es la temperatura de los driver de control de corriente para el movimiento de los motores así como también, la cantidad de corriente que demanda cada motor porque con esto posibilita saber cuál es el motor que más se está esforzando en la fabricación y con ello, se posibilite ajustar el código g para que las acciones de los programas de fabricación sean más controladas.

Por último, la tolerancia a fallos debe abordarse desde el diseño del sistema, incorporando arquitectura distribuida, segmentación de fallas, y sincronización segura entre dispositivos. Estas capacidades son claves para que la plataforma propuesta pueda ser confiable en escenarios reales de producción, minimizando paradas no planificadas y optimizando el mantenimiento predictivo.

13.8 Protocolos usados en CNC

En el contexto de máquinas CNC, el G-code (también conocido como RS-274) es el lenguaje de control estándar que define instrucciones de movimiento y operación para herramientas de corte y fresado. A diferencia de los protocolos de comunicación de red usados en IoT, el G-code se emplea directamente para programar y controlar el comportamiento físico de la máquina, indicando desplazamientos, velocidades, ciclos y operaciones específicas. Es el puente entre el software de diseño (CAD/CAM) y el hardware de fabricación.

En entornos donde se desea aplicar telegestión sobre CNC, se requiere no solo enviar el archivo de G-code sino también poder monitorear su ejecución en tiempo real, validar la recepción correcta, y reaccionar ante errores o paradas inesperadas. Por ello, se hace necesario complementar el uso de G-code con controladores (como GRBL o Marlin) y protocolos de enlace confiables (por ejemplo, comunicación serial o USB virtualizados sobre IP). Este ecosistema permite integrar la lógica de control CNC con soluciones IoT avanzadas que brindan monitoreo remoto, alertas y trazabilidad.

A continuación se presenta la tabla (ver Tabla 2) de los códigos consultados en el ámbito de esta sección.

Tabla 2. Protocolos de CNC.

Protocolo / Lenguaje	Rol principal	Medio de comunicación	Tolerancia a fallos	Compatibilidad IoT	Comentario técnico
G-code (RS-274)	Lenguaje de control de máquina	Serial, USB, SD	Media (requiere supervisión)	Alta (vía GRBL/firmwares)	Estándar universal, muy documentado
GRBL	Firmware intérprete de G-code	Serial (UART/USB)	Alta (buffer, estado)	Alta (compatible con microcontroladores)	Ideal para entornos open-source y económicos
Siemens SI-NUMERIK	Lenguaje CNC y entorno completo	Ethernet, Profibus	Alta (sistemas redundantes)	Media (requiere pasarelas)	Solución cerrada, muy robusta

Fuente: Elaboración propia

13.9 Conclusiones Parciales

En este capítulo se presentó el análisis que muestra las tecnologías de telegestión e IoT ya están siendo incorporadas en las soluciones de alto nivel del mercado (Mazak, Siemens, etc.), pero también existe una ventana de oportunidad para desarrollos accesibles (open source, GRBL, impresoras 3D). Esto abre espacio para desarrollar plataformas asequibles con alto grado de personalización, lo cual es fundamental para pequeñas y medianas empresas.

Asimismo, desde el capítulo 1 se puede concluir que Colombia ha empezado a incorporar CNC en múltiples sectores, pero aún presenta una brecha tecnológica en relación con países industrializados. Esto refuerza la importancia de desarrollar una solución nacional de telegestión, orientada a optimizar procesos industriales a bajo costo, y que puede servir como referencia para otras economías emergentes.

Asimismo, en el capítulo 1 se puede afirmar que se ha logrado establecer la importancia de integrar sensores, software de control y conectividad como parte del ecosistema IoT para CNC. Esta base justifica el desarrollo de un sistema de telegestión, aunque es necesario fortalecer el enfoque en confiabilidad del sistema (monitorización de fallos, recuperación ante errores, control de estado en tiempo real).

En este capítulo 1 se puede se presenta un camino a elegir frente a la decisión tecnológica (. Relevancia del enfoque 3 ejes + G-code + GRBL) que permita simplificar el prototipo del sistema usando tecnologías ampliamente documentadas y replicables, facilitando la experimentación y posterior escalamiento.

El capítulo 1 establece que para cumplir con el atributo de “tolerante a fallos”, se deberá incorporar:

- Monitorización de condiciones anómalas
- Reintentos automáticos y notificación de fallos

14 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES SUSCEPTIBLES A MONITORIZACIÓN Y TELEGESTIÓN PARA UN AMBIENTE DE FABRICACIÓN DE PIEZAS MECANIZADAS USANDO CNC.

En este capítulo, abordamos el segundo objetivo específico de nuestro proyecto, que se centra en la identificación de las variables clave que son susceptibles a monitorización y telegestión en el entorno de fabricación de piezas mecanizadas utilizando máquinas CNC de fresado horizontal de 3 ejes, con un enfoque particular en aplicaciones de grabado y corte en madera. Siguiendo el enfoque

estructural previamente establecido, utilizamos los componentes previamente descritos para lograr este objetivo.

Nuestra primera tarea se enfoca en comprender y analizar las variables críticas en la fabricación de piezas mecanizadas. Esto abarcara la velocidad de corte, la temperatura de la herramienta, la posición de la máquina, la calidad del corte y otros parámetros específicos que influyen directamente en la precisión y calidad de las piezas producidas. Estos aspectos son fundamentales para el proceso de grabado y corte en madera y, por lo tanto, son de gran relevancia para su monitorización y telegestión.

En paralelo, nos sumergimos en la selección de herramientas y tecnologías que facilitarán la monitorización de estas variables. Esto incluye sensores y dispositivos de medición que pueden capturar datos en tiempo real. Además, exploramos los sistemas de control y las interfaces que permiten la comunicación efectiva con las máquinas CNC y la recopilación de datos relevantes.

Al identificar estas variables críticas y comprender cómo se relacionan con el proceso de fabricación de piezas mecanizadas, estamos allanando el camino para el desarrollo de una plataforma de telegestión específica. Estas plataformas permitirán la supervisión en tiempo real de estas variables y la gestión efectiva de las máquinas CNC, lo que, a su vez, mejorará la precisión y la eficiencia en el proceso de grabado y corte en madera.

En resumen, este capítulo se enfoca en la identificación y comprensión de las variables esenciales que se prestarán a la monitorización y telegestión en el contexto de fabricación de piezas mecanizadas utilizando máquinas CNC. Estas variables desempeñan un papel crítico en el proceso de grabado y corte en madera y servirán como base para el desarrollo de la plataforma de telegestión.

14.1 Identificación de Variables clave.

En este proceso de diseño, nos enfocaremos en dos objetivos fundamentales. En primer lugar, nos dedicamos a la identificación de variables críticas susceptibles de monitorización en el entorno de fabricación de piezas mecanizadas mediante máquinas CNC. Esto implica la selección de variables relacionadas con la velocidad de corte, la temperatura de la herramienta, la calidad del corte y otros parámetros que afectaran la producción de piezas mecanizadas.

Con la identificación de estas variables críticas y su comprensión en el proceso de fabricación

de piezas mecanizadas, estamos sentando las bases para el diseño de subsistemas específicos que abordarán cada una de estas variables de manera efectiva.

La elección de las variables críticas, que incluyen la velocidad de corte, la temperatura de la herramienta, la calidad del corte y otras, se basan en una serie de consideraciones fundamentales que respaldan su importancia en el proceso de mecanizado utilizando máquinas CNC.

14.1.1 Impacto en la calidad de las piezas.

La velocidad de corte y la calidad del corte son variables que tienen un impacto directo en la calidad de las piezas mecanizadas. Una velocidad de corte inadecuada o problemas en la calidad del corte pueden resultar en piezas defectuosas o de baja calidad. Monitorear estas variables garantiza la producción de piezas de alta calidad de manera consistente.

14.1.2 Durabilidad de la Máquina Herramienta.

La temperatura de la herramienta es crítica para su durabilidad. Un exceso de temperatura puede acortar la vida útil de las herramientas de corte, lo que resultaría en un aumento de los costos de reemplazo. El monitoreo de la temperatura de la herramienta permite un mantenimiento preventivo y una prolongación de su vida útil.

14.1.3 Eficiencia y productividad.

El tiempo de mecanizado es una variable que influye en la eficiencia y la productividad. Un tiempo de mecanizado ineficiente puede resultar en tiempos de producción más largos y un menor rendimiento general. La monitorización de esta variable permite identificar oportunidades de mejora en la eficiencia de la producción.

14.1.4 Seguridad y Prevención de Fallo.

La vibración de la máquina puede indicar problemas en la operación, como desequilibrios, desgaste de piezas o problemas de alineación. La monitorización de la vibración es esencial para la seguridad y para evitar fallos catastróficos en la máquina que podrían resultar en daños costosos o general peligros para los operadores.

14.1.5 Optimización de Procesos.

Al monitorizar estas variables en tiempo real, se pueden identificar tendencias y patrones que permiten la optimización de los procesos de mecanizado. Esto incluye ajustes en tiempo real para maximizar la eficiencia y minimizar los desechos.

14.1.6 Cumplimiento de Especificaciones.

En muchas industrias, las piezas mecanizadas deben cumplir con especificaciones precisas. El control de estas variables es fundamental para garantizar que las piezas cumplan con los estándares de calidad y tolerancias requeridos.

La elección de estas variables se basa en su impacto directo en la calidad de la fabricación, la durabilidad de las herramientas, la eficiencia, la seguridad y la capacidad de cumplir con las especificaciones. Monitorizar y tele gestionar estas variables contribuye a una fabricación con herramientas CNC más efectiva y eficiente.

14.2 Elección de variables a monitorizar en el ámbito de la telegestión para un ambiente de fabricación de piezas mecanizadas usando CNC

La elección de las variables clave para la monitorización y telegestión en un entorno de fabricación de piezas mecanizadas utilizando una máquina de CNC de fresado, se basa en una estrategia fundamental para mejorar la eficiencia, la calidad y la seguridad del proceso de mecanizado. Estas variables han sido seleccionadas con un enfoque claro en aspectos críticos de la operación CNC, y su monitorización no solo es una cuestión de optimización, sino también de prevención y cumplimiento de estándares.

14.2.1 Velocidad de corte.

La velocidad de corte y la calidad del corte son dos de las variables más esenciales, ya que afecta directamente la calidad de las piezas mecanizadas. Un control preciso de estas variables es esencial para evitar piezas defectuosas o de baja calidad.

14.2.2 Temperatura de la herramienta.

La temperatura de la herramienta es crucial para garantizar la durabilidad de las herramientas de corte, lo que, a su vez, incide en la eficiencia y los costos de operación. La monitorización de la temperatura permite tomar medidas preventivas y prolongar la vida útil de las herramientas.

14.2.3 Tiempo de mecanizado

El tiempo de mecanizado no solo es un indicador de eficiencia, sino también un factor determinante en la productividad general del proceso. La monitorización de esta variable proporciona datos valiosos para la optimización de los mecanizados.

14.2.4 Vibración de la máquina.

La vibración de la máquina no solo es una cuestión de eficiencia y calidad, sino que tiene un impacto directo en la seguridad. La detección temprana de vibraciones inusuales es esencial para evitar fallos catastróficos y riesgos para los operadores.

14.2.5 Posición y vista en video.

La posición y vista en video añade una dimensión de supervisión visual en tiempo real, lo que permite una inspección detallada y control más preciso del proceso de mecanizado.

14.2.6 Calidad del corte.

La calidad del corte es una medida directa de la eficiencia de la operación y su cumplimiento con las especificaciones requeridas. El cumplimiento de tolerancias y especificaciones es una consideración esencial en numerosas industrias, y su monitorización garantizan que las piezas mecanizadas cumplan con los estándares de calidad y tolerancias.

En conjunto, estas variables no solo son fundamentales para el rendimiento y calidad de la operación CNC, sino que también contribuyen a la seguridad, la eficiencia y la capacidad de cumplir con los estándares de calidad requeridos. Su monitorización y telegestión son pasos esenciales hacia una fabricación con herramientas CNC más avanzadas y con veras a una industria más inteligente.

En relación con todo lo descrito anteriormente, a continuación se presenta una tabla (ver

Tabla 3), que afianza la identificación de las variables descritas y agrega componente clave a ser tenidos en cuenta para el diseño del sistema que persigue esta investigación. Tabla 3. Identificación de variables susceptibles a monitorización.

Variable	Esquema de monitorización	Unidad de Medida	Frecuencia de Muestreo	Interfaz / Protocolo	Elementos Decisorios Clave
Velocidad de Corte	Encoder o sensor de velocidad rotacional, o consumo de corriente o por instrucción M-Code	RPM o m/min	1-10 Hz	Analógica/digital, RS-232 o MODBUS	Indica consistencia del corte; variaciones impactan calidad y eficiencia.
Temperatura de la Herramienta	Termopar, Termocupla, Sensor semiconductor digital.	°C/V	1-5 Hz	Analógica, 4-20 mA, Bluetooth o Wi-Fi	Previene sobrecalentamientos; permite mantenimiento preventivo.
Tiempo de Mecanizado	Temporizador integrado, o por software o incluso por hardware	Segundos / Minutos	Variable (según proceso)	GRBL	Evalúa eficiencia del proceso; influye en productividad global.
Vibración de la Máquina	Acelerómetro (sismómetro industrial), sensor piezoeléctrico de varias características	m/s ² o g/V	10-50 Hz	Analógica/digital, MQTT o Modbus	Previene fallos; garantiza seguridad operativa.
Posición y Vista en Video	Encoders lineales/rotativos y cámaras	mm o grados (posición); fps (video)	1-10 Hz (posición); 15-30 fps (video)	Digital, Ethernet/IP o USB, o RTSP con analítica de video	Permite verificación precisa del proceso; mejora control en tiempo real.
Calidad del Corte	Sistema de visión artificial con cámaras e iluminación LED	Indicadores de calidad (escala, % defectos)	1-5 Hz	Ethernet, Wi-Fi o RS-485, analítica de video desde RTSP	Evalúa precisión del corte; detecta desgaste o fallos en herramienta.

RS-232: Recomendación estándar 232 (protocolo de comunicación serie); **MODBUS:** Protocolo de comunicación industrial maestro-esclavo; **GRBL:** Interpretador de comandos G-Code para controladores CNC; **MQTT:** Protocolo ligero de mensajería para redes M2M e IoT (Protocolo de Telemetría de Cola de Mensajes); **RTSP:** Protocolo de transmisión en tiempo real; **USB:** Bus universal en serie; **IP:** Protocolo de Internet; **Wi-Fi:** Red inalámbrica de alta frecuencia (fidelidad inalámbrica); **°C:** Grados Celsius; **mA:** Miliamperios; **RPM:** Revoluciones por minuto; **m/min:** Metros por minuto; **m/s²:** Metros por segundo al cuadrado (aceleración); **g:** Aceleración gravitacional; **fps:** Cuadros por segundo (frecuencia de imagen en video); **V:** Voltios

Fuente: Elaboración propia.

14.3 Conclusiones Parciales

El capítulo 2 identifica de forma clara seis variables clave para la monitorización y telegestión en ambientes CNC: velocidad de corte, temperatura de la herramienta, tiempo de mecanizado, vibración, posición (y vista en video), y calidad del corte. Todas están bien justificadas con base en su impacto sobre la calidad del producto, la eficiencia operativa, la durabilidad de los componentes y la seguridad.

El capítulo 2, apunta al objetivo de diseñar una infraestructura IoT para máquinas CNC. Estas variables son el insumo esencial para estructurar los escenarios de monitorización que se plantearan en el capítulo 3,4,5 asociados al diseño, implementación y posteriores pruebas que se realizaran con el sistema aquí propuesto

El capítulo 2 también combina teoría con viabilidad técnica, al mencionar sensores específicos (acelerómetros, termopares, encoders, cámaras), protocolos estándar (MQTT, RS-232, Modbus, RTSP) y frecuencias de muestreo, lo que dará un camino en el momento de tomar decisiones de ingeniería para la presente tesis.

15 DISEÑO DEL SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN ARTICULADO AL ÁMBITO DE CNC BASADO EN DISPOSITIVOS IoT.

Este capítulo presenta el diseño del sistema de telegestión y monitorización remota orientado al control de máquinas CNC de tres ejes, en cumplimiento del tercer objetivo específico del proyecto. El sistema se articulará a partir de un diseño compuesto por núcleos y subsistemas técnicos interconectados.

La infraestructura del sistema contemplará tanto componentes de hardware como de software, cuya finalidad será capturar, procesar y visualizar en tiempo real variables críticas del proceso de mecanizado, tales como la temperatura de la herramienta, el consumo eléctrico, el tiempo de ejecución, la posición de los ejes y la visualización en video del área de trabajo, tal como se evidenció desde el capítulo 2 donde se determinaron elementos críticos de gestión en el ámbito CNC.

Además y entre otros, se incorporará un subsistema de visualización 3D para simular el recorrido de la herramienta a partir de los datos de operación, y se añadirá un subsistema de transmisión remota para ofrecer video en tiempo real. La interfaz de usuario permitirá a los operadores monitorear las condiciones de operación y ejercer control remoto de manera segura, restringido al personal autorizado.

El diseño también contemplará mecanismos de notificación (SMS y llamadas automáticas) ante eventos relevantes, como el inicio o finalización de un mecanizado o incluso si existiese un fallo en el sistema también se generarán notificaciones. De este modo, el sistema de telegestión que se va a presentar se configurará como una solución integral, adaptable al entorno CNC, que garantizará eficiencia, seguridad y trazabilidad mediante el uso de tecnologías IoT, entre otras.

15.1 Propuesta del Diseño: SIMCNC (Sistema de IoT de Telegestión para máquinas CNC)

Con el objetivo de proporcionar una solución eficiente y escalable al control y monitoreo de máquinas CNC, se propone el diseño del sistema **SIMCNC**. Este sistema estará estructurado a partir de un diseño compuesto por cuatro núcleos funcionales esenciales, cada uno enfocado en un área crítica del proceso de mecanizado para garantizar eficiencia, seguridad y trazabilidad; cada núcleo deriva a la creación de subsistemas que se encargaran de temas específicos en coherencia con el diseño de ingeniería planteado en este capítulo.

Para el diseño del sistema de telegestión se ha planteado entonces 4 núcleos que serán descritos a continuación:

- Núcleo de usuarios
- Núcleo operativo
- Núcleo de Ingeniería
- Núcleo de Integración

Posterior a esto, se presentará el escenario de integración y relaciones entre los núcleos planteados y sus subsistemas así como los requerimientos generales de diseño que deben ser

tenidos en cuenta para llegar a implementar el SIMCNC

15.1.1 Núcleo de usuarios

El Núcleo de Usuarios es esencial para gestionar el acceso y los permisos de los diversos actores que interactúan con el sistema. Sin una estructura clara de roles y permisos, el sistema estaría expuesto a errores operativos y riesgos de seguridad. Este núcleo asegura que clientes, operarios internos y operadores remotos puedan interactuar con el sistema de acuerdo con su nivel de autorización. Los clientes acceden a información general sin interferir en las operaciones, mientras que los operarios internos y operadores remotos tienen acceso a funciones específicas de control y supervisión. Así, se garantiza una gestión segura y eficiente del sistema, permitiendo que cada usuario tenga acceso solo a la información y funcionalidades necesarias para cumplir su rol.

Este núcleo se encargará de gestionar el acceso y los permisos de los diferentes tipos de usuarios dentro del sistema, asegurando que cada uno tenga acceso adecuado a las funciones y datos según su rol. Los principales usuarios serán:

- **Clientes:**
Los clientes son aquellos usuarios externos que tienen acceso a los servicios proporcionados por el sistema SIMCNC, tales como informes generales de desempeño, resultados de producción o visualización remota de procesos. Los clientes no tienen control sobre los procesos operativos, pero pueden monitorear el estado de la operación.
- **Operarios Internos:**
Personal que interactúa directamente con las máquinas CNC y supervisa la operación.
- **Operadores Remotos:**
Técnicos autorizados que podrán controlar y supervisar el sistema a distancia, bajo condiciones específicas de acceso.

15.1.2 Núcleo operativo.

Este núcleo es crucial porque agrupa los componentes que gestionan directamente los procesos de mecanizado y asegura que se lleven a cabo de forma óptima. Sin estos subcomponentes, el sistema no podría controlar adecuadamente las máquinas CNC ni supervisar en tiempo real las variables operativas clave.

Este núcleo se divide en tres subsistemas esenciales que interactúan de forma complementaria para asegurar el correcto funcionamiento del proceso de mecanizado:

- **Procesos de Mecanizado CNC:** Gestiona los parámetros operativos específicos de las máquinas CNC, tales como velocidad de corte, movimientos de los ejes, trayectorias de la herramienta y configuraciones de trabajo. El control de estos parámetros es fundamental para garantizar la precisión y calidad del mecanizado.
- **Monitorización:** Responsable de la captura y visualización en tiempo real de datos críticos, como la temperatura de la herramienta, el consumo energético, el tiempo de ejecución y la posición de los ejes. Esto permite que los operarios internos puedan realizar ajustes en tiempo real y optimizar la producción.

- **Alertas y Notificaciones:** Genera alertas y notificaciones automáticas en tiempo real ante eventos críticos, tales como anomalías en los parámetros operativos o fallos del sistema. Las alertas se transmiten a través de diversos canales, como mensajes visuales en la interfaz, notificaciones por correo electrónico o SMS, permitiendo una intervención rápida por parte de los operadores remotos y operarios internos.

15.1.3 Núcleo de ingeniería

Este núcleo se ocupa de la gestión técnica de los subsistemas que son esenciales para garantizar la operación continua y segura de las máquinas CNC. La inclusión de estos subsistemas dentro del diseño del sistema SIMCNC es fundamental para optimizar el rendimiento y asegurar la trazabilidad de todo el proceso de producción.

Este núcleo está compuesto por una serie de subsistemas que trabajan en conjunto para garantizar la eficiencia y la trazabilidad del proceso de mecanizado de las máquinas CNC. Los subsistemas (Sub) que conforman este núcleo son:

- **Sub. de Monitorización y Control Remoto de Máquinas CNC**
 - Este subsistema se encarga de capturar y mostrar en tiempo real los datos relevantes de las máquinas CNC, tales como las posiciones de los ejes, velocidad de corte, consumo energético y temperatura de la herramienta.
 - Además, permite realizar el control remoto de las máquinas, lo que habilita a los operarios o supervisores para ajustar parámetros y realizar intervenciones a distancia, garantizando un control completo sobre las operaciones sin necesidad de presencia física.
 - Permite controlar y visualizar remotamente variables como ejes, velocidades y condiciones térmicas.
- **Sub de visualización en Tiempo Real**
 - Proporciona una interfaz gráfica que permite a los usuarios ver el estado de las máquinas y los procesos de mecanizado en tiempo real.
 - La visualización puede incluir información detallada sobre el progreso de la producción, las condiciones operativas y las alertas activas.
 - Este subsistema facilita la supervisión continua por parte de los operarios internos y operadores remotos.
 - Muestra gráficamente el estado del sistema y los procesos de mecanizado en desarrollo.
- **Sub de Gestión de Órdenes de Trabajo y Registro de Producción**
 - Este subsistema gestiona las órdenes de trabajo y los registros de producción, asegurando que cada proceso de mecanizado esté bien documentado.
 - Las órdenes de trabajo pueden incluir detalles sobre el tipo de pieza a fabricar, los parámetros del proceso y el tiempo estimado de ejecución.
 - El registro de producción permite hacer un seguimiento de las piezas producidas, el tiempo de cada operación y el desempeño de la máquina.

- Organiza, registra y hace seguimiento de cada tarea de mecanizado y su cumplimiento.
- **Sub de Integración IoT y Actualizaciones**
 - Este subsistema se encarga de integrar los dispositivos IoT presentes en las máquinas CNC y otros equipos relacionados con la producción, permitiendo la recopilación de datos en tiempo real.
 - Además, gestiona las actualizaciones de software del sistema y las máquinas, asegurando que siempre estén optimizadas con la última versión disponible para mejorar la funcionalidad y seguridad.
 - Gestiona la incorporación de sensores, conectividad IoT y actualizaciones del sistema o firmware.
- **Sub de Registro de Errores y Mantenimiento**
 - Este subsistema registra cualquier error o anomalía que ocurra durante los procesos de mecanizado, incluyendo detalles sobre las condiciones previas, el tipo de error y las acciones correctivas tomadas.
 - El registro de mantenimiento incluye información sobre las intervenciones realizadas, los mantenimientos preventivos y las reparaciones, garantizando la trazabilidad de la vida útil de la máquina.
 - Almacena información técnica sobre fallos, intervenciones realizadas y mantenimiento preventivo.
 - Incorpora un componente de tolerancia a fallos que permite mantener la continuidad del proceso de mecanizado
- **Sub de Bases de Datos y Almacenamiento**
 - Este subsistema es responsable de almacenar toda la información generada por los otros subsistemas, asegurando que los datos estén disponibles de manera segura y accesible.
 - Las bases de datos almacenan la información de la producción, las configuraciones de las máquinas, los registros de errores y el historial de mantenimiento, permitiendo la trazabilidad y análisis posterior.
 - Custodia todos los datos operativos, de configuración, producción, mantenimiento y alertas.

15.1.4 Núcleo de integración

El Núcleo de Integración es un componente clave dentro del sistema SIMCNC porque actúa como el puente entre el sistema central y los dispositivos externos, tales como máquinas CNC, sensores IoT y otras plataformas tecnológicas. Sin este núcleo, el sistema no podría comunicarse eficazmente con los dispositivos de hardware o recibir datos en tiempo real. Este núcleo permite que la comunicación bidireccional se realice de forma fluida, asegurando que los datos críticos de las máquinas CNC sean transmitidos de forma rápida y precisa al sistema central para su procesamiento y visualización. Además, garantiza que el sistema pueda ser escalable, añadiendo nuevos dispositivos o sistemas sin comprometer la estabilidad

ni la eficiencia.

Este núcleo independiente es un componente clave que facilita la comunicación bidireccional entre el sistema central y dispositivos externos o plataformas, permitiendo que el sistema funcione de manera integrada y en tiempo real.

Funciones del Núcleo de Integración:

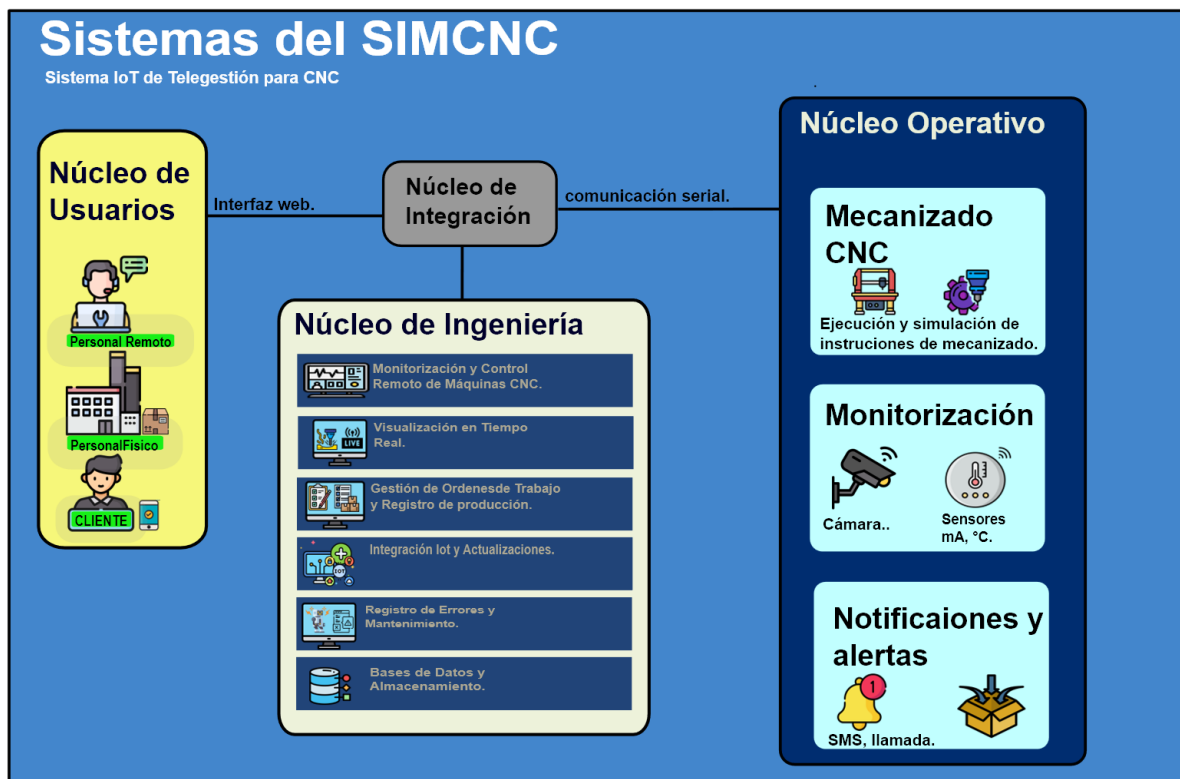
- **Dispositivo Embebido**
 - El núcleo funciona a través de un dispositivo embebido que actúa como la interfaz entre el sistema central y el entorno externo.
 - Permite recibir, procesar y transmitir datos de forma eficiente, asegurando que todos los sistemas interconectados funcionen correctamente.
 - Soporta físicamente este núcleo, y se encarga del procesamiento en campo de datos.
- **Comunicación entre Sistemas Externos e Internos**
 - Gestiona el flujo de datos entre el sistema central y otros dispositivos externos (como máquinas CNC, sensores IoT, etc.).
 - Garantiza la compatibilidad y el intercambio de datos sin que interfiera directamente con los otros subsistemas.

Permite la transmisión fluida y bidireccional de información.

- **Interoperabilidad**
 - Asegura la interoperabilidad entre tecnologías diversas, permitiendo que el sistema se conecte con diferentes plataformas o dispositivos sin problemas de compatibilidad.
 - Facilita la integración de nuevos dispositivos y sistemas que se añaden al ecosistema sin necesidad de reconfigurar el sistema central.
 - Permite conectar el sistema con tecnologías de terceros sin conflictos de compatibilidad.
- **Facilita el Control Remoto**
 - Proporciona la capacidad de **control remoto** y supervisión de los procesos, permitiendo a los operadores intervenir de manera remota en tiempo real.
 - Habilita la supervisión y operación remota del sistema a través de redes seguras.

Se resalta que el núcleo de Integración es un componente independiente que gestiona la comunicación entre el sistema central y otros dispositivos externos, asegurando que todos los sistemas puedan integrarse sin problemas de compatibilidad. Funciona como un dispositivo embebido que garantiza la interoperabilidad y facilita el control remoto del SIMCNC . A continuación se presenta una ilustración(ver Figura 1),donde se presentan los subsistemas que comprenden el diseño planteado a nivel de ingeniería y como estos se articulan a cada núcleo planteado.

Figura 1. Diseño de sistemas y núcleos del SIMCNC.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez analizados los subsistemas que componen los núcleos descritos anteriormente, a continuación se presenta el análisis del diseño de como cada uno de los subsistemas interactuaran para el funcionamiento adecuado del SIMCNC.

15.2 Integración de los Subsistemas y Núcleos del Sistema SIMCNC

La integración de los diferentes subsistemas y núcleos dentro del sistema SIMCNC se realiza a través del diseño modular planteado que permite que todos los componentes operen de manera cohesiva. Esta estructura modular facilita la interoperabilidad entre las distintas partes del sistema, garantizando que cada núcleo y subsistema funcione en conjunto para proporcionar un control y monitoreo efectivos de las máquinas CNC.

15.2.1 Conexión entre Núcleos Funcionales

Cada uno de los núcleos funcionales (Usuarios, Operación, Ingeniería e Integración) se conecta mediante interfaces bien definidas que permiten el flujo de datos entre ellos sin que interfieran entre sí. La integración entre estos núcleos asegura que el sistema SIMCNC sea escalable, flexible y adaptable, de manera que se pueda añadir o actualizar subsistemas sin

afectar el rendimiento general.

- Núcleo de Usuarios interactúa con el Núcleo de Operación, permitiendo que los operadores y clientes accedan a la información y el control de las máquinas.
- El Núcleo operativo incluye la monitorización, gestión de órdenes de trabajo y alertas, se conecta con el Núcleo de Ingeniería, donde se realizan las tareas técnicas como la monitorización y control remoto, la visualización en tiempo real, y la gestión de la producción.

15.2.2 Integración de la Tecnología IoT

El Núcleo de Integración juega un papel fundamental en la integración del sistema, ya que conecta todos los dispositivos IoT presentes en las máquinas CNC y otros sistemas del entorno que será diseñado. Los dispositivos IoT, como sensores de temperatura, energía y posición de los ejes, permiten que los datos sean capturados en tiempo real y procesados para generar informes o activar alertas y notificaciones cuando sea necesario.

15.2.3 Conectividad y Control Remoto a través de la Interfaz de Integración

El Núcleo de Integración, como componente independiente, asegura que todos los subsistemas puedan comunicarse de forma eficiente, sin interferencias. A través de este núcleo, se posibilita la interacción con plataformas externas, como interfaces de usuario, dispositivos remotos y sistemas de control, lo que permite el control remoto de las máquinas CNC y la supervisión remota de todos los procesos operativos.

15.2.4 Coordinación en Tiempo Real.

El sistema SIMCNC está diseñado para operar en tiempo real, lo que significa que la comunicación entre los subsistemas se realiza sin retrasos, y las decisiones sobre los procesos de mecanizado, como ajustes de parámetros y la ejecución de tareas de mantenimiento, se hacen al instante. Esto se logra mediante un sistema de mensajería eficiente, que conecta todos los subsistemas para permitir una respuesta rápida ante cualquier eventualidad o requerimiento.

15.2.5 Seguridad y Control de Accesos.

La integración de los sistemas también contempla la gestión de la seguridad de la información y el control de accesos. Cada subsistema tiene controles de acceso específicos que aseguran que solo los usuarios autorizados puedan interactuar con los procesos operativos y las máquinas. Esto es fundamental tanto para garantizar la seguridad operativa.

La integración del sistema SIMCNC se logra mediante un diseño modular de los subsistemas anteriormente descritos ya que interconecta los núcleos funcionales propuestos. A través de la comunicación en tiempo real, el intercambio de datos entre subsistemas, y la interoperabilidad de los dispositivos IoT, el sistema garantiza un control efectivo y una

supervisión completa de los procesos de mecanizado CNC. Además, la seguridad y el control de accesos son fundamentales para asegurar que solo los usuarios autorizados puedan interactuar con los subsistemas, proporcionando una solución robusta y eficiente.

15.3 Requerimientos generales para el Diseño del Sistema SIMCNC

Para el diseño del sistema SIMCNC es fundamental contar con una base tecnológica que asegure su funcionamiento eficiente, seguro y en tiempo real. Por ello, es necesario definir los elementos a grandes rasgos que componen los núcleos descritos entendiendo que estos deben ser funcionales y poder interactuar entre los otros ya definidos, garantizando así una solución completa de telegestión que es lo que busca esta tesis de grado. A continuación se establecen para el diseño características fundamentales para llevar a cabo el sistema de telegestión:

15.3.1 Dispositivos de Captura y Supervisión en Campo

En el área de operación se requerirán dispositivos que permitan recopilar información clave, como condiciones de temperatura, movimiento y posición, así como cámaras para supervisar en tiempo real el proceso. También serán necesarios equipos que puedan procesar y transmitir esta información de forma continua y confiable, y sistemas que aseguren la alimentación eléctrica sin interrupciones para evitar fallas.

15.3.2 Nodos de Procesamiento Central y Almacenamiento de Datos

El sistema contará con una unidad central que reciba y gestione la información recopilada, almacenándola de manera organizada y segura. Este centro deberá tener la capacidad suficiente para procesar los datos en tiempo real y ofrecer un acceso estable y rápido para los usuarios autorizados.

15.3.3 Terminales de Acceso y Dispositivos para Usuarios Finales

Los operadores y supervisores utilizarán estaciones de trabajo y dispositivos móviles para interactuar con el sistema, visualizando datos y controlando el proceso a distancia. Estos dispositivos deberán contar con conexión confiable y acceso protegido para garantizar la seguridad y la eficiencia del sistema.

15.3.4 Componentes de Software y Funcionalidades Operativas del Sistema

El sistema integral SIMCNC está compuesto por diferentes núcleos y subsistemas que a su vez, establecen componentes específicos que trabajan de manera conjunta y flexible. Estos subsistemas y componentes gestionan la información y permiten la comunicación fluida entre los distintos núcleos. Además, se desarrollarán interfaces intuitivas para que los usuarios puedan supervisar y controlar las operaciones fácilmente desde cualquier lugar.

Se contemplan también herramientas para la visualización interactiva del proceso, notificaciones automáticas para alertar sobre cualquier eventualidad, y mecanismos que

aseguren que sólo usuarios autorizados puedan acceder a la información y funciones del sistema.

15.3.5 Comunicación y Seguridad

El diseño considera canales dedicados en términos seriales para la transmisión de datos, asegurando que la información se mantenga protegida y que el sistema pueda adaptarse y crecer según las necesidades futuras.

15.3.6 Integración Funcional para la Optimización de Procesos y la Gestión en PYMES

El diseño del SIMCNC permite abordar de manera estructurada y automatizada los distintos requerimientos del proceso de mecanizado, logrando mejoras significativas en la eficiencia operativa, la trazabilidad y la capacidad de respuesta ante fallos, elementos clave para pequeñas y medianas empresas (PYMES) del sector manufacturero.

El Núcleo de Usuarios debe establecer un control de acceso robusto, asegurando que cada tipo de usuario interactúe con el sistema según su perfil y responsabilidades, lo que reduce el riesgo de errores operativos.

El Núcleo Operación debe proporcionar herramientas para el control preciso del mecanizado, la supervisión en tiempo real de variables críticas y la emisión de alertas ante condiciones anómalas.

El Núcleo de Ingeniería centraliza funciones clave como la monitorización remota, el registro de producción, la gestión de mantenimiento y la detección de errores, habilitando una estructura tolerante a fallos que contribuye directamente a la continuidad operacional.

El Núcleo de Integración permite la comunicación efectiva entre el sistema central y dispositivos externos (como sensores IoT, máquinas CNC o en su posible interacción con plataformas en la nube), facilitando la interoperabilidad y escalabilidad del sistema.

15.3.7 Tolerancia a fallos

El sistema de telegestión debe generar en su diseño un escenario tolerante a fallos que se integre a la solución y que permita al SIMCNC operar de forma constante y autónoma durante todos los procesos de mecanizado. En esencia este requerimiento debe garantizar la continuidad operativa de la máquina CNC, anticipando, detectando y respondiendo de manera proactiva ante condiciones anómalas que puedan comprometer la integridad del proceso o del equipo.

15.4 Elementos de diseño

A continuación, se presenta una tabla (ver Tabla 4), aborda de manera general que resume los requerimientos funcionales de hardware y software necesarios para el diseño del sistema SIMCNC. Esta tabla no detalla aspectos técnicos específicos, ya que dichos elementos corresponden a la fase de implementación. En cambio, se enfoca en identificar los

componentes clave que deben considerarse en la etapa de diseño, organizados por categoría y función dentro del sistema. La estructura de la tabla distingue entre los elementos de hardware requeridos en campo, en el servidor central y en los terminales de usuario, así como los módulos de software que darán soporte a la operación, control, visualización e integración del sistema.

Tabla 4.Requerimientos Funcionales de Hardware y Software para el Diseño del Sistema SIMCNC.

Categoría	Elemento	Descripción Funcional
Hardware	Sensores	Captura de variables clave del entorno operativo como temperatura, consumo eléctrico, posición de ejes, esenciales para trazabilidad y mantenimiento predictivo.
	Cámaras	Supervisión visual continua del proceso de mecanizado mediante transmisión en tiempo real, permitiendo intervención remota y respaldo visual para análisis de calidad.
	Unidades de control local	Recopilación local de datos desde la máquina CNC, transformando señales físicas en datos digitales para el sistema central.
	Módulos de comunicación	Conexión estable entre sensores y el sistema de procesamiento a través de protocolos industriales, asegurando envío confiable de datos en tiempo real.
	Sistema de respaldo energético	Garantiza continuidad operativa ante interrupciones eléctricas, clave para procesos sensibles como el mecanizado continuo.
	Plataforma central de procesamiento	Centro de operaciones encargado del análisis, almacenamiento y procesamiento de datos para decisiones en tiempo real.
	Infraestructura de red	Estructura de red que enlaza sensores, actuadores y nodos de visualización, facilitando la comunicación entre subsistemas.
	Estaciones de trabajo	Puntos de operación local que permiten interacción directa del personal con el sistema para ajustes, monitoreo y mantenimiento.
	Dispositivos móviles	Acceso remoto seguro para técnicos o clientes autorizados, habilitando supervisión o validación de resultados desde cualquier ubicación.
Software	Sistema operativo	Entorno base que soporta la ejecución de todas las funciones del sistema, optimizado para hardware embebido.
	Soporte para dispositivos embebidos	Componentes que habilita la interacción con sensores y actuadores conectados al sistema, compatible con plataformas IoT.
	Aplicación de control y monitoreo	Permite el control de máquinas, visualización de variables críticas y configuración remota, mejorando la eficiencia operativa.
	Gestión de usuarios y accesos	Controla roles y niveles de acceso para garantizar ciberseguridad y evitar acciones no autorizadas.
	Almacenamiento de información	Gestiona los datos del sistema incluyendo logs operativos, registros de producción, alertas y mantenimiento.
	Interfaz gráfica de usuario	Presenta de forma amigable la información del sistema para facilitar el monitoreo en tiempo real y la toma de decisiones.
	Módulo de notificaciones	Genera alertas instantáneas sobre eventos críticos para prevenir daños o detener procesos anómalos.
	Integración con otros sistemas	Facilita el intercambio de información con plataformas externas o ERP, permitiendo expansión y escalabilidad del sistema.
	Sistema de gestión de eventos	Coordina acciones automatizadas ante eventos, optimizando la respuesta del sistema frente a condiciones operativas anómalas.

Fuente: Elaboración propia.

15.5 Conclusiones parciales

El diseño del sistema SIMCNC se basa en la integración de *núcleos funcionales* claramente definidos que permiten organizar las funcionalidades del sistema de forma lógica y jerarquizada. Esta estructura favorece la escalabilidad, la trazabilidad y la modularidad, características esenciales en entornos industriales inteligentes.

La división en subsistemas por núcleo permite aislar responsabilidades tales como adquisición de datos, procesamiento, visualización, control de acceso o gestión de fallos. Esto no solo mejora la mantenibilidad del sistema, sino que también permite implementar mejoras futuras de forma focalizada.

Se ha priorizado la usabilidad del sistema mediante interfaces intuitivas, visualización en tiempo real y módulos de notificación ante eventos críticos. También se incorporan mecanismos de gestión de accesos que aseguran la integridad de la información y del sistema.

La propuesta técnica responde a los requerimientos de la realidad de los procesos mecanizados de las pymes y atiende los problemas que se presentan en el contexto de estos procesos

Por último se presentó una tabla que incorpora dispositivos y elementos que serán utilizados en el proceso de implementación de esta propuesta la cual requiere la integración de sensores, cámaras, microcontroladores, sistemas de respaldo y nodos embebidos que permiten una captura robusta y en tiempo real de variables clave del proceso de mecanizado. Esta elección tecnológica garantiza la posibilidad de monitoreo continuo en talleres CNC de bajo o mediano volumen.

16 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN INDUSTRIAL, PARA EL ÁMBITO DE CNC.

En este capítulo se describe la implementación del sistema de telegestión y monitorización industrial utilizado para el control remoto de una máquina CNC mediante una plataforma web. Este sistema facilita la operación de la máquina de manera remota, permitiendo al operador realizar ajustes y supervisar el estado de la máquina en tiempo real. En este capítulo se alinea el diseño con las tecnologías empleadas para llevar a cabo el SIMCNC.

Para llegar a la implementación del sistema de telegestión se requieren tomar decisiones muy precisas frente a los elementos de hardware y software que se van a utilizar para desarrollar esta propuesta tomando siempre como base los requerimientos expuestos.

Por lo anterior, a continuación y tomando de base los núcleos previamente definidos en el diseño (capítulo 3) y posteriormente cada uno de sus subsistemas y teniendo de referencia los requerimientos ya descritos, a continuación se presenta la justificación de las tecnologías que se van a elegir para llegar a cabo el sistema de telegestión. En este sentido, la siguiente tabla contempla dispositivos de carácter general, protocolos, entre otros escenarios de tecnologías de software; que van a ser utilizados en el desarrollo de la propuesta, la cual, debe contemplar elementos de bajo costo y fáciles de conseguir en el mercado para que se facilite la introducción de este tipo de implementaciones en el entorno de emprendimientos que se articulen hacia los procesos de mecanizados basados en CNC.

Con estos dispositivos se van a orquestar las diferentes funcionalidades de cada uno de los núcleos y subsistemas que desarrollan lógicas claras para que se afiance el escenario integral y operativo del sistema de telegestión.

La tabla (ver Tabla 5), que se presenta a continuación resume los principales componentes y tecnologías utilizados en el sistema de telegestión y monitorización para la fabricación de piezas mecanizadas. Cada fila describe el nombre del componente, su función en el sistema, el criterio de elección para su integración y su justificación dentro del contexto de la ingeniería y la Industria 4.0.

Las decisiones tomadas en cuanto a la selección de estas tecnologías se basan en criterios clave como la eficiencia operativa, la compatibilidad con entornos embebidos, y la capacidad de adaptación a las necesidades de los emprendimientos industriales, especialmente aquellos de pequeñas y medianas empresas (PYMEs). Estos componentes no solo buscan optimizar el rendimiento y la fiabilidad del sistema, sino también facilitar la escalabilidad, la automatización y la implementación en contextos de producción real, alineándose con las tendencias de la Industria 4.0.

Este enfoque modular permite integrar tecnologías accesibles, económicas y escalables, ideales para emprendedores o pequeños fabricantes que buscan mejorar la eficiencia de sus operaciones sin requerir grandes inversiones en infraestructura o personal técnico especializado.

Tabla 5. Elementos que componen la implementación.

Tecnología / Componente	Función en el sistema	Criterio de elección	Justificación en Ingeniería (Industria 4.0 / Emprendimientos)
Raspberry Pi 4	Nodo central de procesamiento y visualización embebido	Económico, ampliamente documentado, soporte para Python y Linux; adecuado para entornos embebidos industriales.	Permite consolidar múltiples funciones en un solo dispositivo con bajo consumo y bajo costo, ideal para PYMES o microempresas.
ESP32-CAM/Reolink E1 ZOOM	Captura de imágenes del área de mecanizado	Módulo compacto, bajo costo, buena resolución de imagen y conectividad Wi-Fi integrada.	Facilita la trazabilidad visual sin añadir complejidad o requerimientos de hardware externo especializado.
Sensor DS18B20	Medición de temperatura y humedad en la zona de operación CNC	Sensor simple y económico con suficiente precisión para ambientes cerrados.	Permite control ambiental básico sin inversión en sensores industriales complejos.
Sensor de corriente ACS712	Monitoreo de consumo eléctrico en tiempo real	Sensor analógico de bajo costo para corriente alterna y continua.	Contribuye a la eficiencia energética y diagnóstico preventivo con una solución económica.
Cámara IP (RTSP)	Supervisión visual alternativa en tiempo real mediante RTSP	Provee monitoreo visual externo sin necesidad de integrar directamente en el nodo central.	Complementa la visualización embebida para respaldar auditoría o asistencia técnica remota.
SQLite	Almacenamiento de datos locales sin servidor externo	Ligero, fácil de usar, ideal para almacenamiento local embebido.	Minimiza requerimientos de infraestructura, asegurando autonomía del sistema embebido.
Python (CGI)	Backend para lógica de control, consulta y comunicación	Lenguaje versátil, ideal para scripts de control en sistemas embebidos.	Soporta lógica embebida flexible con bajo requerimiento de procesamiento; escalable y mantenible.
Servidor HTTP Apache	Atención de solicitudes HTTP sin necesidad de servidor externo	Evita la necesidad de instalar un stack completo de servidor, ideal para sistemas livianos.	Reduce la complejidad del sistema y mejora su confiabilidad operativa en campo.
Twilio API	Notificaciones al usuario (SMS, llamadas) ante eventos	Fácil de integrar, escalable y compatible con alertas SMS/voz en tiempo real.	Fortalece la respuesta automatizada sin infraestructura compleja, útil para emprendimientos sin personal técnico permanente.
Protocolo HTTP / CGI	Transmisión de datos sensor-interfaz mediante HTTP	Protocolo abierto, ampliamente soportado, facilita integración entre sensores y backend.	Alineado con prácticas modernas de comunicación ligera en IoT; no requiere librerías propietarias.
Plataforma Web	Interfaz de visualización de datos en múltiples dispositivos	Acceso universal desde cualquier dispositivo; no requiere aplicaciones específicas.	Mejora la experiencia del usuario final y reduce la curva de adopción del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan entonces cada uno de los núcleos que conforman el sistema de telegestión y como se desarrolló e implementó cada uno de sus Subsistemas

En el núcleo del sistema se encuentran los Sistemas de Ingeniería, agrupados en seis subsistemas principales:

- Monitorización y control remoto de máquinas CNC.
- Visualización en tiempo real del proceso.
- Gestión de órdenes de trabajo y registro de producción.
- Integración IoT y actualizaciones.
- Registro de errores y mantenimiento.
- Bases de datos y almacenamiento.

Estos subsistemas interactúan directamente con los Procesos Operativos, que abarcan:

- Mecanizado CNC, ejecutando instrucciones a partir de archivos G-code o archivos con extensión .ngc.
- Monitorización, mediante una cámara con protocolo RTSP y sensores IoT que capturan variables como corriente (mA) y temperatura (°C).
- Notificaciones y alertas, generadas ante eventos relevantes del sistema, que son transmitidas mediante servicios como Twilio vía SMS u otros canales.

A continuación y siguiendo el diseño propuesto se aborda la implementación de cada uno de los núcleos descritos y cada uno de sus subsistemas.

16.1 Núcleo de Usuarios

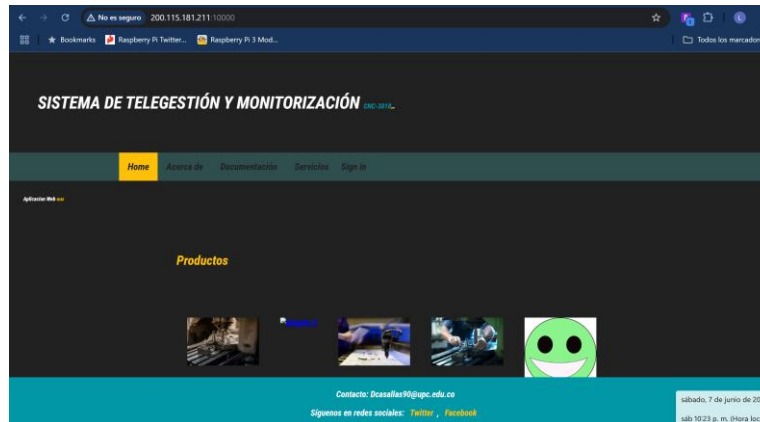
El núcleo de usuarios comprende un escenario de desarrollo web bastante amplio porque incorpora tipos de usuarios y demás elementos que se alinean al sistema en consideración con los roles que estos tengan en la plataforma. En esencia, los clientes son aquellos usuarios externos que tienen acceso a los servicios proporcionados por el sistema SIMCNC, tales como informes generales de desempeño, resultados de producción o visualización remota de procesos. Los clientes no tienen control sobre los procesos operativos, pero pueden monitorear el estado de la operación.

En este núcleo se emplearon para su implementación tecnologías de tipo HTML, CSS, algunos componentes de JavaScript en relación con las herramientas como FFmpeg que es una herramienta de línea de comandos de código abierto que permite convertir, grabar, editar y transmitir archivos de audio y video en múltiples formatos. Esta se tomó en cuenta para la implementación dado que es compatible con casi todos los códecs existentes y se utiliza ampliamente por su eficiencia para tareas como la compresión de videos, extracción de audio, cambio de resolución, incorporación de subtítulos o transmisión en vivo. Adicionalmente encaja muy bien en el entorno tanto Windows, Linux y macOS, y es ideal para este núcleo que requiere procesamiento multimedia automatizado o personalizado.

Este nivel de usuarios cuenta también con una interfaz web (ver Figura 2), para registro y control de los usuarios donde es viable elegir su rol en coherencia con lo que se determine desde el nivel de administración.

El escenario de la plataforma se presenta en la figura siguiente:

Figura 2. Sistema de telegestión.



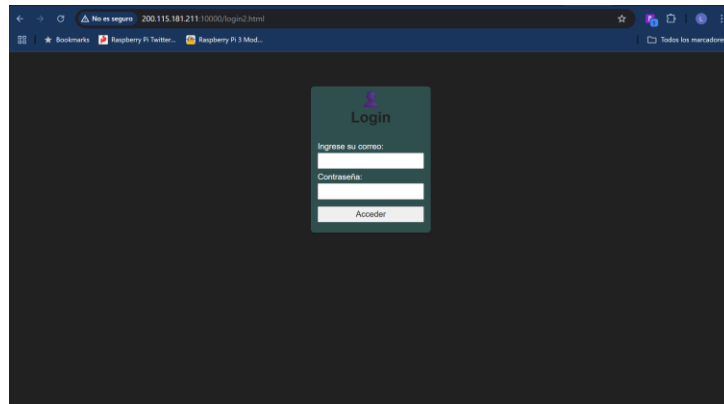
Fuente: Elaboración propia.

La gestión de usuarios es una parte fundamental de cualquier plataforma digital. En este proyecto, se implementó un sistema de registro de usuarios, que permite a los usuarios crear cuentas, almacenar su información y acceder a la plataforma. El sistema está compuesto por un formulario de registro, un Backend que procesa los datos y los guarda en una base de datos SQLite, y un diseño visual atractivo para una mejor experiencia de usuario.

16.1.1 Registro del usuario

El proceso comienza con el formulario de registro, que está diseñado en la página registro.html. En este formulario, los usuarios ingresan datos personales como su nombre, correo electrónico, nombre de usuario, contraseña y teléfono. El formulario está vinculado a un script Python (registro.py), que se encarga de procesar y almacenar los datos cuando se envían, como se muestra en la figura (ver Figura 3).

Figura 3. Login.

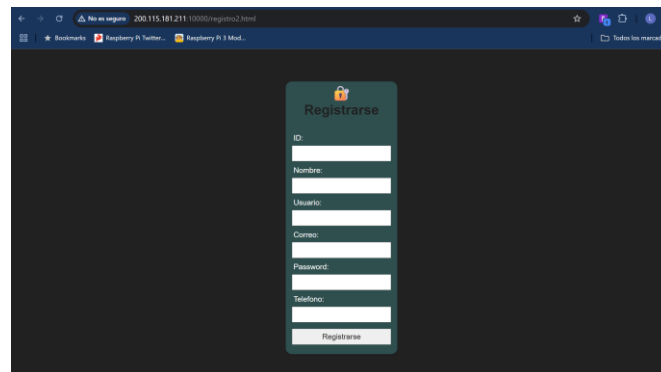
A screenshot of a web browser window displaying a login interface. The browser's address bar shows the URL '200.115.181.211:10000/login.html'. The login form is centered on a dark background and features a light green header with the word 'Login' and a user icon. Below the header, there are two input fields: the first is labeled 'Ingresar su correo:' and the second is labeled 'Contraseña:'. At the bottom of the form is a button labeled 'Acceder'.

Fuente: Elaboración propia.

Campos de entrada: Los usuarios deben completar campos como ID, Nombre, Usuario, Correo Electrónico, Contraseña y Teléfono. Cada campo tiene un label claro que indica el tipo de dato requerido.

- Botón de envío: Un botón "Registrarse" (ver Figura 4) permite al usuario enviar los datos al Backend para su procesamiento.

Figura 4. Captura de la interfaz de registro.

A screenshot of a web browser window displaying a registration interface. The browser's address bar shows the URL '200.115.181.211:10000/registro.html'. The registration form is centered on a dark background and features a light green header with the word 'Registrarse' and a user icon. Below the header, there are six input fields with labels: 'ID:', 'Nombre:', 'Usuario:', 'Correo:', 'Password:', and 'Telefono:'. At the bottom of the form is a button labeled 'Registrarse'.

Fuente: Elaboración propia.

16.1.2 Aspectos clave del formulario de registro del usuario:

- Cada campo tiene un label asociado que describe el tipo de dato que se debe ingresar.
- El formulario utiliza el método POST para enviar los datos al Backend de la aplicación.

- El botón de **"Registrarse"** permite enviar la información al servidor para su validación, como se muestra en la figura (ver Figura 4).

16.1.3 Proceso de Registro en el Backend

Cuando el usuario envía el formulario, los datos son recibidos y procesados por el script en **Python** llamado registro.py. Este script realiza varias funciones clave:

Paso 1. Recibe los datos del formulario:

El script utiliza el módulo CGI para manejar los datos enviados por el formulario, accediendo valores como **ID, nombre, usuario, correo electrónico, contraseña y teléfono**.

Paso 2. Verificación de la existencia del correo electrónico:

Se realiza una consulta a la base de datos **SQLite** para comprobar si el correo electrónico del usuario ya está registrado. Si el correo ya existe, se muestra un mensaje al usuario indicando que la cuenta ya está registrada.

Línea relevante: La consulta SQL que verifica si el correo ya está en la base de datos:

Python

```
sql0 = "SELECT EMAIL FROM USUARIOS WHERE EMAIL = '%s'" % correo
```

Paso 3. Inserción de nuevos usuarios:

Si el correo no está registrado, el script procede a insertar los nuevos datos en la tabla **USUARIOS**. La operación se realiza con una sentencia SQL **INSERT** que guarda la información del usuario en la base de datos.

Línea relevante:

La consulta SQL que inserta los datos del nuevo usuario:

Python

```
sql1 = "INSERT INTO USUARIOS (NOMBRE, USER, EMAIL, PASSWORD, TELEFONO) VALUES ('%s', '%s', '%s', '%s', '%s')" % (nombre, usuario, correo, password, telefono)
```

Paso 4. Mensajes de éxito o error: Después de completar la verificación y el registro, el script devuelve un mensaje al usuario, informándole si el registro fue exitoso o si hubo algún error.

16.1.4 Estructura de la Base de Datos

El sistema utiliza una base de datos **SQLite**, ligera y eficiente, para almacenar la información de los usuarios. La base de datos contiene una tabla llamada **USUARIOS** con los siguientes campos:

- ID (auto incrementable y único)
- NOMBRE

- USER
- EMAIL
- PASSWORD
- TELEFONO

El script crear_tabla.py se encarga de crear esta tabla en la base de datos si no existe previamente. La estructura de la tabla permite almacenar todos los datos necesarios para el registro y gestión de los usuarios, como se ve en la figura (ver Figura 5).

Aspectos clave:

- La tabla USUARIOS tiene un campo ID que se autoincrementa, asegurando que cada usuario tenga un identificador único.
- Los campos de correo electrónico y nombre de usuario son NOT NULL, lo que significa que no pueden quedar vacíos al registrar un usuario.

Figura 5. Vista de base de datos.

cid	name	type	notnull	dflt_value	pk
0	ID	INTEGER	1		1
1	NOMBRE	TEXT	1		0
2	USER	TEXT	1		0
3	EMAIL	TEXT	1		0
4	PASSWORD	TEXT	1		0
5	TELEFONO	TEXT	1		0


```
sqlite> SELECT * FROM USUARIOS;
```

ID	NOMBRE	USER	EMAIL	PASSWORD	TELEFONO
1017	raspberry	pi	raspberry@org.co	raspberrry	31[REDACTED]45
1290	KALIX	K[REDACTED]	K[REDACTED]	123456	31[REDACTED]19
66666	fernanda	c[REDACTED]	c[REDACTED]	123212	31[REDACTED]74
1598475	juanito	j[REDACTED]	j[REDACTED].co	123123	75[REDACTED]32
1[REDACTED]	daniel	daniel90	dcasallas90@upc.	1231234	31[REDACTED]76
1[REDACTED]	fabian	f[REDACTED]	f[REDACTED].t	123123	30[REDACTED]71
1458747854	ALEJANDRO	A[REDACTED]	a[REDACTED].om	123654587	458745874

```
sqlite> █
```

Fuente: Elaboración propia.

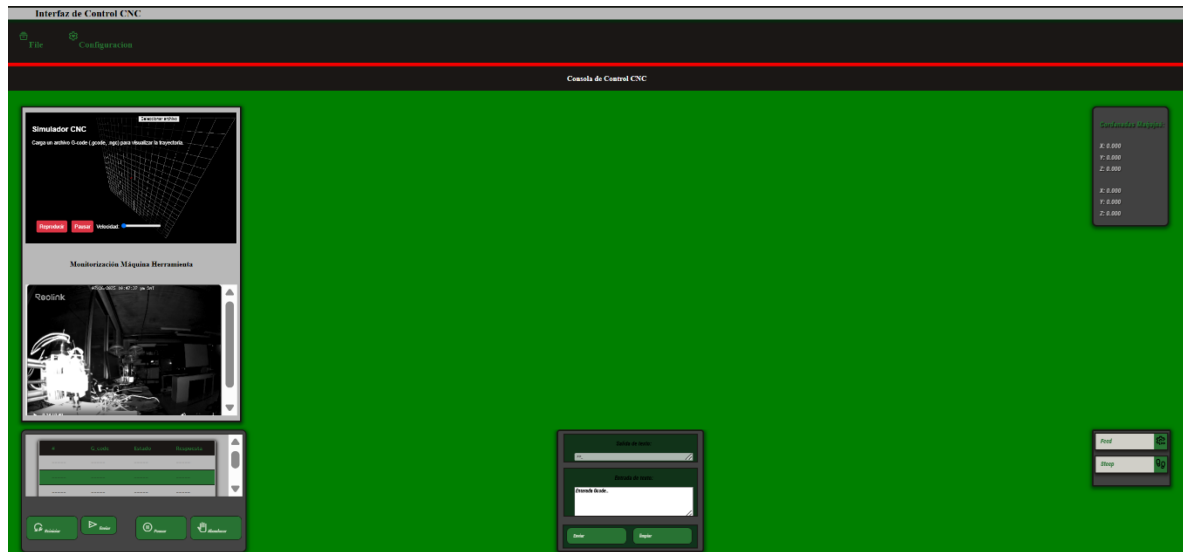
En este modo quien actúa de administrador genera los diferentes roles de usuarios para la plataforma y con esto se generan accesos a alguno u otros servicios dependiente del rol del usuario.

16.2 Núcleo Operativo.

Este núcleo comprende los subsistemas de mecanizado CNC, parte de la monitorización visual para el rol del cliente y embebe las alertas y notificaciones que genera en tiempo real la plataforma ante eventos críticos y adicionalmente, genera información para el usuario

final (ver Figura 6), en cuanto al estado de lo que este envía a fabricación. Su vista es la siguiente.

Figura 6. Esquema web de usuario final.

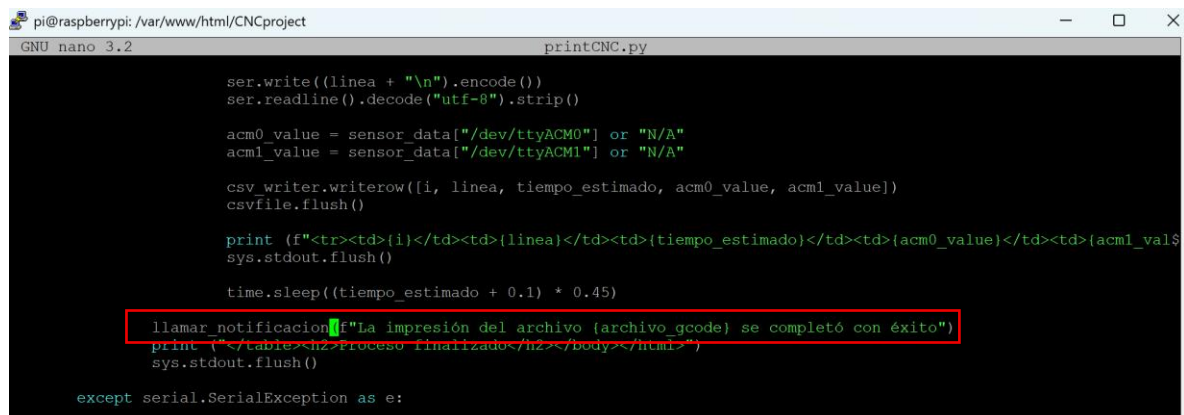


Fuente: Elaboración propia.

16.2.1 Subsistemas de procesos de mecanizado y subsistemas de notificaciones y alertas

Este núcleo operativo integra los subsistemas de procesos de mecanizado y paralelamente el subsistema de alertas. Este núcleo permite incluso cargar el archivo .ngc que desea el usuario para que posteriormente, entre en cola una vez sea autorizada su producción por parte del rol de usuario de administración de la plataforma. Asimismo, una vez la orden de servicio entra en producción, el sistema notifica al usuario que su mecanizado ha entrado en proceso de producción. Al finalizar este proceso, se podría generar un aviso al usuario final por medio de correo electrónico o SMS para que este sepa que el proceso de fabricación ha finalizado, de hecho, la notificación que se implementó en esta tesis de grado fue la realización de una llamada telefónica (ver Figura 7), en relación con el teléfono que este registro el usuario para que se le avise de forma automática el cierre del proceso y posteriormente, se genere el proceso de envío de lo que ha enviado a fabricar el usuario final.

Figura 7. Esquema de código para generación de llamadas telefónicas con el API/REST de Twilio.



```
pi@raspberrypi: /var/www/html/CNCproject
GNU nano 3.2 printCNC.py

ser.write((linea + "\n").encode())
ser.readline().decode("utf-8").strip()

acm0_value = sensor_data["/dev/ttyACM0"] or "N/A"
acm1_value = sensor_data["/dev/ttyACM1"] or "N/A"

csv_writer.writerow([i, linea, tiempo_estimado, acm0_value, acm1_value])
csvfile.flush()

print (f"<tr><td>{i}</td><td>{linea}</td><td>{tiempo_estimado}</td><td>{acm0_value}</td><td>{acm1_val$
sys.stdout.flush()

time.sleep((tiempo_estimado + 0.1) * 0.45)

llamar_notificacion(f"La impresión del archivo {archivo_gcode} se completó con éxito")
print ("</table><h2>Proceso finalizado</h2></body></html>")
sys.stdout.flush()

except serial.SerialException as e:
```

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la llamada se tomó ventaja del API de Twilio que es una plataforma de comunicaciones en la nube que permite integrar servicios como mensajería, llamadas telefónicas, videollamadas y autenticación en aplicaciones web o móviles. Para esto se tomó ventaja del API REST y el lenguaje Python, y el componente de Twilio llamado TwiML (Twilio Markup Language), con el cual es posible realizar llamadas telefónicas programadas o interactivas a bajo costo, permitiendo crear flujos de voz personalizados desde cualquier sistema conectado.

Por otra parte, en el núcleo de operación se cuenta también con una relación con quien debe estar pendiente del escenario completo de CNC (mecanizado), es decir, con el operario y con el administrador. Lo anterior quiere decir que este subsistema de alertas también genera alertas de posibles errores que pudiesen presentarse al momento del mecanizado y esta información la reciben los actores descritos.

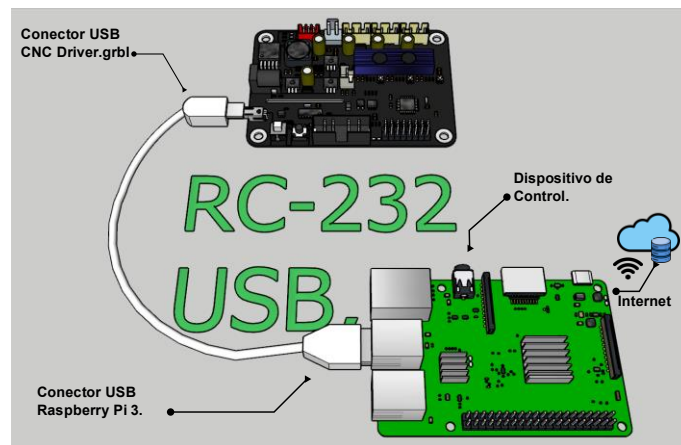
16.2.1.1 Diagrama de Conexión entre Raspberry Pi y la Tarjeta de Control GRBL

La figura (ver), ilustra el diagrama de conexión entre el Raspberry Pi y la tarjeta de control GRBL, destacando cómo se establece la comunicación mediante un cable USB que conecta el Raspberry Pi con el puerto serial RS232 de la tarjeta de control. A través de este enlace, el Raspberry Pi puede enviar y recibir datos directamente del firmware GRBL, permitiendo una interacción precisa con la máquina CNC.

El cable USB sirve como el medio físico para la transferencia de los datos G-code desde el Raspberry Pi a la tarjeta GRBL, la cual se encarga de ejecutar los comandos para controlar el movimiento de los ejes de la máquina. Esta comunicación serial permite obtener respuestas en tiempo real sobre el estado de la máquina, lo que resulta esencial para monitorear el progreso del mecanizado, detectar posibles errores y ajustar parámetros de operación de manera remota.

La figura (ver Figura 8), muestra este diagrama de conexión, resaltando la funcionalidad de la conexión por cable USB, que proporciona una transmisión estable y eficiente de datos entre el Raspberry Pi y la tarjeta de control GRBL, asegurando que el sistema pueda gestionar el proceso de mecanizado de manera fluida y sin interrupciones.

Figura 8. Diagrama de Conexión.



Fuente: Elaboración propia.

16.2.2 Subsistema de Monitorización

En la vista principal denominada Consola de Control CNC (ver Figura 9), se ve la parte de monitorización visual del operario, se integran diversos componentes esenciales que permiten al operador interactuar con la máquina en tiempo real. La sección superior incluye una barra de navegación y un encabezado descriptivo que contextualiza la interfaz. Justo debajo, se encuentra el panel de control, compuesto por botones con iconografía basada en Material Design, que permiten ejecutar movimientos específicos de la máquina, como traslaciones en los ejes X, Y y Z, activación o detención, entre otros comandos. Estos botones están vinculados a scripts CGI en Python que procesan y ejecutan instrucciones G-code directamente en la máquina.

En el área central de la interfaz, se ubican dos visores integrados por medio de iframes: uno destinado a la simulación virtual del código G (por ejemplo, utilizando servicios como ncviewer.com) y otro que muestra en tiempo real el comportamiento físico de la máquina mediante

un flujo de video capturado desde una cámara RTSP. Para esto, se emplearon dos cámaras: una Reolink E1 Zoom y una ESP32-CAM, que permiten monitorear el proceso de mecanizado de forma remota, asegurando visibilidad y control durante toda la operación. Estos visores permiten validar visualmente las trayectorias y operaciones antes y durante la ejecución.

Adicionalmente, se incluye una consola de entrada y salida de comandos, donde el operador puede escribir instrucciones G-code personalizadas y visualizar la respuesta inmediata de la máquina, lo cual facilita la depuración de errores y mejora el control manual. Junto a esta consola, una tabla dinámica de estado muestra de forma secuencial los comandos enviados y las respuestas obtenidas, permitiendo un seguimiento claro del historial de operación.

El sistema también incluye una serie de componentes de hardware de monitoreo para garantizar la seguridad y el rendimiento de la máquina CNC durante el proceso. Se han integrado sensores de corriente ACS712 para medir el consumo eléctrico de la máquina, y sensores de temperatura DS18B20 que monitorean la temperatura de los componentes críticos. Esta información es recogida en tiempo real y presentada al operador a través de la interfaz, lo que mejora la capacidad de diagnóstico y la prevención de fallos.

En la parte inferior de la vista, se encuentran indicadores de coordenadas en tiempo real, que reflejan tanto la posición actual de la herramienta en el espacio de trabajo como las coordenadas absolutas de la máquina. Además, el sistema también incluye controles de configuración, como menús desplegables para definir parámetros como velocidad de avance (feed) y paso de movimiento (step), los cuales pueden ser enviados al backend sin necesidad de recargar la página. Estos valores son recogidos mediante campos ocultos y transmitidos a los scripts encargados de ejecutar los comandos, asegurando coherencia entre la configuración y la operación.

El software también incluye un script en Python que maneja la comunicación serial RS232 entre la tarjeta de potencia y el firmware GRBL, capturando los mensajes de respuesta de la tarjeta de control de la máquina CNC. Esto permite visualizar los valores directamente en la interfaz, asegurando que el operador tenga información precisa sobre el estado de la máquina en tiempo real.

Finalmente, el footer de la interfaz presenta mensajes informativos sobre el estado del sistema, como confirmaciones de comandos, alertas o avisos de conectividad, mejorando la transparencia y usabilidad durante el proceso de mecanizado.

Todos estos elementos están dispuestos en una única pantalla centralizada que facilita el flujo operativo, reduce errores y mejora la interacción del operador con la máquina para monitorización .

Figura 9. Vista general de la consola de control CNC.



Fuente: Elaboración propia.

16.3 Núcleo de Ingeniería

A continuación se presenta la implementación del núcleo de ingeniería

16.3.1 Sub. de Monitorización y Control Remoto de Máquinas CNC

El subsistema de monitorización y control remoto del núcleo de ingeniería del sistema

SIMCNC está diseñado para facilitar tanto la gestión de operaciones de mecanizado como la supervisión del estado de la máquina CNC en tiempo real. Este subsistema se basa en una arquitectura de software que emplea CGI (Common Gateway Interface) y un servidor web Apache para habilitar la interacción remota a través de una interfaz accesible desde cualquier ubicación.

El servidor Apache juega un rol fundamental al hospedar la aplicación web que constituye la interfaz del sistema SIMCNC. Esta aplicación se comunica con la máquina CNC utilizando CGI, un mecanismo que permite ejecutar scripts en Python en el servidor para procesar los comandos enviados por el operador y actualizar en tiempo real la información del estado de la máquina. A través de este sistema, los operadores pueden cargar archivos G-code, ajustar parámetros de la máquina y supervisar el progreso del mecanizado desde la interfaz centralizada de SIMCNC.

Para garantizar que el sistema sea accesible desde cualquier ubicación remota, el servidor de la aplicación está configurado con una IP estática que permite la conexión externa. La IP estática es accesible desde fuera de la red local, proporcionando acceso a través de un puerto específico, como el puerto 10000. Esto significa que los operadores pueden conectarse al servidor desde cualquier lugar, ya sea en la misma instalación o de forma remota, utilizando un navegador web y accediendo al sistema mediante la dirección IP pública y el puerto previamente configurado.

Una vez dentro del sistema, el operador puede interactuar con la interfaz que permite controlar y monitorear el estado de la máquina CNC. Los scripts CGI en Python juegan un papel clave en este proceso, ya que permiten la comunicación bidireccional entre la interfaz web y la máquina CNC. Estos scripts se encargan de enviar comandos G-code al firmware GRBL de la máquina para ejecutar movimientos de los ejes y otras operaciones, mientras que, al mismo tiempo, reciben actualizaciones en tiempo real sobre el estado de la máquina, las coordenadas actuales, los parámetros de operación y las alertas de posibles errores.

El sistema también permite la actualización dinámica de la información en la interfaz en tiempo real. A medida que el operador ajusta los parámetros de la máquina, como la velocidad de avance o el paso de movimiento, estos cambios se reflejan en la interfaz sin necesidad de recargar la página. Además, los sensores de hardware conectados a la máquina, como los sensores de corriente y temperatura, proporcionan datos en tiempo real, los cuales son procesados por los scripts y presentados en la interfaz de manera instantánea, lo que permite al operador tomar decisiones informadas y realizar ajustes sin interrupciones.

Una característica clave de este enfoque es la capacidad de ejecutar y detener el proceso de mecanizado de manera remota. Los operadores pueden cargar archivos G-code desde la interfaz web, y el sistema se encargará de enviarlos a la máquina CNC para iniciar el proceso. Durante la ejecución, los scripts proporcionan información en tiempo real sobre el avance del proceso, lo que permite una supervisión constante y la corrección de posibles errores desde la distancia.

La IP estática y el puerto abierto en el servidor Apache permiten que este sistema sea accesible desde fuera, garantizando una conectividad confiable y segura para el monitoreo y control remoto de la máquina CNC en cualquier momento. Además, los scripts de Python que gestionan la comunicación serial entre la máquina y el servidor aseguran que cualquier

cambio en el estado de la máquina sea inmediatamente reflejado en la interfaz, proporcionando una experiencia de control remoto fluida y precisa.

El servidor también permite la integración con cámaras de monitoreo RTSP, lo que ofrece un flujo de video en tiempo real para que el operador pueda visualizar el proceso de mecanizado de forma remota, asegurando visibilidad continua sobre las operaciones.

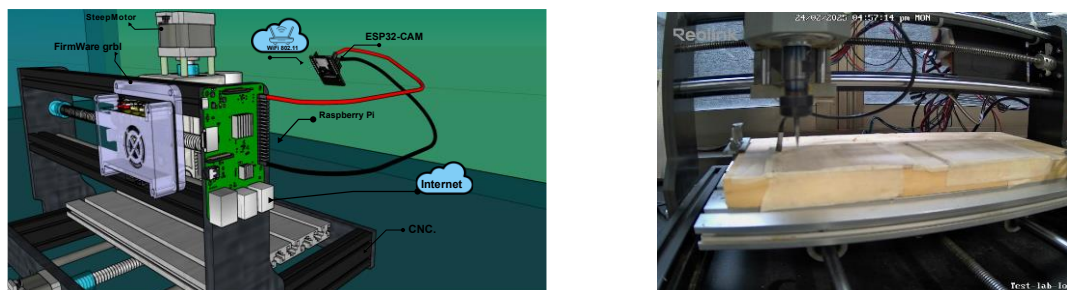
En resumen, el subsistema de monitorización y control remoto dentro del núcleo de ingeniería del sistema SIMCNC combina el uso de un servidor Apache, CGI, scripts en Python y una IP estática accesible a través de un puerto específico para habilitar el control remoto y la monitorización en tiempo real de las máquinas CNC. Esta configuración proporciona una solución robusta que permite a los operadores gestionar el proceso de mecanizado de forma remota, con la posibilidad de recibir actualizaciones instantáneas y realizar ajustes sobre la marcha, mejorando la flexibilidad y la eficiencia en la operación.

16.3.2 Sub de visualización en Tiempo Real

El sistema de visualización en tiempo real constituye un componente esencial dentro de la plataforma de telegestión y monitorización remota de máquinas CNC, ya que permite observar directamente el proceso de mecanizado mediante una transmisión de video en vivo. Esta funcionalidad no solo facilita la supervisión remota de las operaciones, sino que también proporciona una capa adicional de verificación visual para la detección temprana de errores, fallos mecánicos o condiciones inseguras durante la ejecución del código G.

La transmisión de video se realiza a través del módulo **ESP32-CAM**, el cual captura imágenes en tiempo real y las transmite utilizando el protocolo **RTSP (Real Time Streaming Protocol)** a través de la red local. Este flujo de video es recibido y gestionado por el **Raspberry Pi**, que actúa como nodo central del sistema (ver Figura 10). En este dispositivo se ejecuta un servicio de redirección asistido por **FFmpeg**, el cual permite redistribuir el flujo de video hacia la interfaz web del sistema o a cualquier cliente compatible con RTSP.

Figura 10. Esquema de conexión RTSP entre ESP32 CAM y el sistema de monitoreo.



Fuente: Elaboración propia.

El acceso al video puede realizarse tanto desde la red local (LAN) como desde Internet (WAN), utilizando la dirección IP y el puerto previamente configurados. Esta capacidad de acceso remoto otorga a los operadores una herramienta eficaz para supervisar el estado operativo de las máquinas CNC desde cualquier ubicación geográfica, a través de

navegadores web o incluso mediante una aplicación móvil (APK). La integración del protocolo RTSP con el servidor web permite una visualización fluida directamente desde la consola de monitoreo, sin necesidad de instalar software adicional.

Esta capacidad de observación instantánea de cada fase del proceso de mecanizado permite identificar y corregir irregularidades de manera inmediata, contribuyendo a una operación más precisa y eficiente. En un entorno donde la precisión es crítica, contar con una vista en tiempo real de los movimientos y acciones de la máquina representa una ventaja significativa para los operadores y responsables técnicos, quienes pueden tomar decisiones informadas en tiempo real.

Además de su función de supervisión directa, este sistema ha sido concebido con una visión de escalabilidad. La implementación actual sienta las bases para la futura integración de tecnologías avanzadas como visión por computador e inteligencia artificial (IA), que permitirán realizar análisis automáticos sobre el video en tiempo real, como la detección de defectos, reconocimiento de patrones o identificación de condiciones de riesgo. Estas tecnologías emergentes tienen el potencial de transformar la visualización pasiva en una herramienta de automatización inteligente capaz de asistir en la toma de decisiones operativas.

Asimismo, la posibilidad de acceder al video en tiempo real desde dispositivos móviles fortalece la capacidad de respuesta ante eventos imprevistos y mejora la eficiencia en la gestión remota. Esta flexibilidad permite mantener una supervisión constante y dinámica, elevando los estándares de confiabilidad y calidad en los procesos de mecanizado. Paralelamente a la cámara utilizada también se dispuso una cámara adicional más potente con funciones de PTZ para el seguimiento del proceso mecanizado, para este caso se usó una cámara tipo Reolink E1 ZOOM con esquema API/REST que fue integrado también en este proyecto.

En conjunto, el sistema de visualización en tiempo real no solo fortalece el monitoreo visual del proceso CNC, sino que también representa una plataforma versátil y preparada para evolucionar hacia soluciones de fabricación inteligente. Su integración con dispositivos IoT, junto con su potencial de ampliación hacia servicios basados en IA, consolida su papel dentro del ecosistema de la Industria 4.0 como un recurso avanzado para la supervisión, el control y la optimización continua.

16.3.3 Sub de Gestión de Órdenes de Trabajo y Registro de Producción

El subsistemas de registro de producción y órdenes de trabajo representa un componente clave dentro de la arquitectura general de la plataforma de telegestión, al permitir la recolección, estructuración y consulta de datos operativos en entornos de fabricación CNC. Cada proceso de mecanizado queda registrado de forma automática en una base de datos centralizada, donde se almacena información crítica como:

- Tiempos de mecanizado reales.
- Parámetros tecnológicos empleados.
- Nombre y ruta del archivo de código ejecutado (*.ngc).
- Evidencias visuales mediante imágenes o fotografías.

Esta estructura de almacenamiento contribuye a la trazabilidad completa del proceso productivo, facilitando el análisis posterior, la mejora continua y la validación técnica de cada tarea ejecutada.

La gestión de órdenes de trabajo, como servicio integrado, permite planificar, asignar y hacer seguimiento de cada operación, asegurando no solo un control eficiente sobre el flujo de producción, sino también una base sólida para la toma de decisiones operativas y estratégicas.

El sistema brinda a los responsables la capacidad de registrar y monitorear en tiempo real el estado de cada orden de trabajo, lo que permite mantener un control exhaustivo sobre la ejecución y los recursos involucrados. Esta funcionalidad fortalece la capacidad de planificación y permite identificar desviaciones, tiempos muertos o cuellos de botella en el proceso.

Además, al contar con un historial detallado de cada orden, es posible efectuar análisis comparativos, evaluar desempeños pasados y detectar tendencias, lo que convierte al sistema en una herramienta predictiva. Gracias a esta visión, se facilita la toma de decisiones proactivas que optimicen la asignación de tareas, los recursos humanos, la carga de máquina y la eficiencia general del sistema productivo.

La información recopilada mediante esta gestión también resulta vital para evaluar la calidad y consistencia de los productos, ya que permite identificar correlaciones entre variables de producción y los resultados obtenidos. La detección temprana de patrones que indiquen desviaciones en la ejecución o posibles problemas logísticos permite anticipar intervenciones correctivas antes de que ocurran fallos mayores.

De este modo, el sistema de registro de producción y gestión de órdenes de trabajo no solo actúa como un mecanismo de coordinación, sino que también habilita una infraestructura de control inteligente orientada a la mejora continua, al análisis de datos históricos y a la toma de decisiones basada en información verificable. Todo esto lo convierte en un pilar funcional de la plataforma, alineado con los principios de trazabilidad, eficiencia y confiabilidad propios de los entornos industriales automatizados.

16.3.4 Sub de Integración IoT y Actualizaciones

El subsistema de integración IoT y actualizaciones representa uno de los componentes estratégicos del sistema SIMCNC, al ofrecer una arquitectura abierta, modular y escalable que permite la incorporación progresiva de nuevos dispositivos, servicios y funcionalidades. Esta capacidad de expansión está directamente relacionada con las decisiones de diseño adoptadas desde las fases iniciales del proyecto, las cuales priorizaron la interoperabilidad, la estandarización y la preparación para futuras integraciones tecnológicas.

Gracias al uso de protocolos abiertos como HTTP, RTSP, el sistema permite integrar dispositivos IoT adicionales, como sensores, actuadores, cámaras o módulos externos, que se comuniquen con la plataforma mediante interfaces físicas (USB, GPIO) o inalámbricas (Wifi). Esta flexibilidad facilita que nuevos subsistemas puedan ser añadidos sin alterar la lógica de operación existente, asegurando así la escalabilidad horizontal de la plataforma.

El sistema operativo Raspbian, empleado en el servidor embebido (Raspberry Pi), junto con el servidor web Apache2 y la lógica programada en Python (vía CGI), conforman un entorno estable, adaptable y ampliamente soportado, que permite modificar o actualizar los servicios del sistema sin afectar su núcleo funcional. Esta arquitectura permite agregar nuevas interfaces, integrar librerías de terceros o conectar con APIs externas con relativa facilidad.

En cuanto a los servicios en la nube, SIMCNC incorpora herramientas como Twilio, la cual permite el envío de notificaciones multicanal (SMS, llamadas telefónicas o correo electrónico) desde el subsistema de notificaciones y alertas, activadas por condiciones críticas detectadas en tiempo real. La implementación de este tipo de servicios demuestra la capacidad del sistema para extenderse más allá de los límites de la red local, permitiendo su interacción con plataformas externas a través de Internet, y preparando el terreno para la incorporación futura de servicios como AWS IoT, Google Cloud IoT Core o Microsoft Azure IoT Hub.

Además, la lógica del sistema admite actualizaciones en caliente del software, incluyendo la interfaz web, el Backend de procesamiento o los módulos de visualización, lo que garantiza una evolución constante del sistema conforme a las necesidades del entorno productivo. Esta capacidad de actualización continua es esencial para incorporar mejoras, corregir errores, o adaptar el sistema a nuevas condiciones de operación o requerimientos de seguridad.

En conjunto, el subsistema de integración IoT y actualizaciones habilita la evolución natural del sistema SIMCNC, consolidando una plataforma viva y adaptable, lista para expandirse en línea con los principios de la Industria 4.0 y las exigencias cambiantes de los entornos industriales inteligentes.

16.3.5 Sub de Registro de Errores y Mantenimiento

El subsistema de registro de errores y mantenimiento tiene como función principal capturar, almacenar y organizar los datos generados por los sensores durante los procesos de mecanizado. Este módulo opera como parte integral del núcleo de ingeniería del sistema SIMCNC, y se articula directamente con el subsistema de mecanizado, al registrar información específica asociada a cada orden de trabajo ejecutada por la máquina CNC.

Una vez finalizado cada proceso de mecanizado, el sistema activa un procedimiento automático de adquisición y registro de datos provenientes de sensores IoT, los cuales monitorean variables críticas como temperatura, consumo de corriente, vibración, entre otros. Estos datos se almacenan en archivos CSV individuales, que se generan dinámicamente al término de cada operación, y se vinculan de manera directa con el archivo de mecanizado ejecutado, lo que permite una trazabilidad precisa de cada proceso productivo.

Para facilitar el acceso y consulta de esta información, la plataforma web autogenera un enlace asociado a cada orden ejecutada, el cual permite al operador visualizar o descargar el

archivo CSV correspondiente desde la interfaz. Adicionalmente, todos los registros son almacenados localmente en el servidor embebido, lo que asegura la disponibilidad permanente de los datos para análisis posterior, incluso en caso de desconexión de la plataforma.

Este mecanismo de registro estructurado permite construir un historial técnico completo del funcionamiento de la máquina a lo largo del tiempo. En caso de ocurrir una falla crítica o evento anómalo, las condiciones operativas asociadas quedan documentadas, lo cual facilita la identificación de causas raíz, el diseño de estrategias de mantenimiento correctivo, y la optimización futura de los parámetros de mecanizado.

Gracias a esta infraestructura de documentación automática, es posible establecer umbrales de operación seguros, definir ritmos de trabajo más eficientes, y aplicar modelos de mantenimiento preventivo o predictivo. En conjunto, este subsistema fortalece la confiabilidad operativa, reduce los tiempos de inactividad no planificada, y extiende la vida útil del equipo en entornos industriales de producción CNC.

16.3.6 Sub de Bases de Datos y Almacenamiento

El subsistema de bases de datos y almacenamiento constituye el componente central de persistencia de información dentro del sistema SIMCNC. Su función principal es garantizar que todos los eventos, registros de operación y datos relevantes queden almacenados de forma estructurada, segura y accesible para su consulta, análisis o trazabilidad histórica.

Este subsistema está implementado mediante dos bases de datos independientes desarrolladas en SQLite3, lo que permite una gestión embebida ligera, eficiente y sin necesidad de servidores externos. Su estructura modular responde a las necesidades funcionales del sistema y se organiza de la siguiente manera:

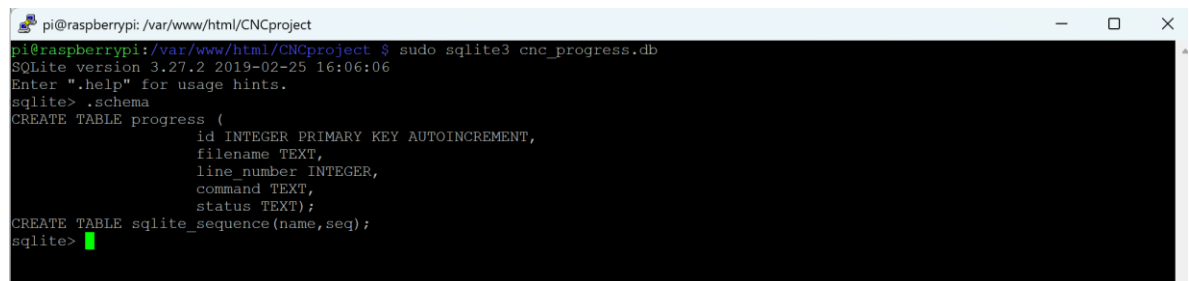
- **Base de Datos de Usuarios:** Esta base de datos almacena el registro completo de los usuarios que interactúan con la plataforma. Incluye información como credenciales de acceso, permisos asignados, historial de actividad y configuraciones personalizadas. Su existencia permite implementar mecanismos de autenticación y control de acceso, asegurando que solo usuarios autorizados puedan ejecutar comandos críticos o visualizar información sensible del sistema CNC.
- **Base de Datos de Procesos de Impresión y Producción:** Esta base gestiona los registros vinculados a las órdenes de mecanizado y los distintos eventos generados durante su ejecución. Contiene información detallada sobre el archivo de G-code ejecutado, el estado del proceso (en cola, en ejecución, completado, fallido), el tiempo de duración, y los registros de errores generados por otros subsistemas. Cada registro se asocia a una orden de trabajo específica, lo cual permite trazar el desempeño de cada operación y realizar análisis posteriores de eficiencia, calidad o fallos operativos.

Ambas bases de datos están alojadas en el servidor embebido principal (Raspberry Pi), lo cual facilita el acceso local, reduce latencias y simplifica la integración con los demás servicios de la plataforma. Su diseño relacional permite realizar consultas complejas para correlacionar datos entre usuarios, procesos y errores, lo que fortalece las capacidades analíticas del sistema.

El subsistema también cumple una función crítica en la trazabilidad, ya que consolida la información generada por distintos módulos: sensores, sistema de mecanizado, interfaz web y subsistemas de notificación. Esta consolidación de datos permite no solo el monitoreo en tiempo real, sino también la auditoría técnica y la toma de decisiones basada en datos históricos.

En conjunto, el subsistema de bases de datos y almacenamiento asegura la integridad, disponibilidad y estructuración del conocimiento generado durante la operación del sistema SIMCNC, convirtiéndose en un pilar esencial para la evolución hacia entornos de manufactura inteligente, trazabilidad completa y mantenimiento predictivo.

Figura 11. Estructura de la base de datos cnc_progress.db utilizada para la ejecución de comandos G-code.



```

pi@raspberrypi: /var/www/html/CNCproject
pi@raspberrypi: /var/www/html/CNCproject $ sudo sqlite3 cnc_progress.db
SQLite version 3.27.2 2019-02-25 16:06:06
Enter ".help" for usage hints.
sqlite> .schema
CREATE TABLE progress (
  id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
  filename TEXT,
  line_number INTEGER,
  command TEXT,
  status TEXT);
CREATE TABLE sqlite_sequence(name,seq);
sqlite>
  
```

Fuente: Elaboración propia.

La figura (ver Figura 11), muestra la definición de la tabla(ver)en la base de datos cnc_progress.db, alojada en el servidor embebido de la plataforma SIMCNC. Esta base de datos permite llevar un control detallado del avance de cada proceso de mecanizado, registrando línea por línea el código G ejecutado por la máquina CNC, junto con su estado correspondiente. Cada registro almacena el nombre del archivo de mecanizado, el número de línea ejecutada, el comando G-code enviado y el estado de la instrucción tras su ejecución.

La siguiente tabla (ver Tabla 6). resume el propósito de cada campo definido en la estructura de la base de datos:

Tabla 6. Campos db.

Campo	Tipo	Función dentro del sistema CNC
id	INTEGER	Identificador único y autoincremental para cada registro.
filename	TEXT	Nombre del archivo de mecanizado (*.ngc o *.gcode) en ejecución.
line_number	INTEGER	Número de línea del código G correspondiente al registro.
command	TEXT	Instrucción G-code enviada a la máquina CNC.
status	TEXT	Estado de ejecución de ese comando (ej. "OK", "Error", etc.).

Fuente: Elaboración propia.

Este esquema permite implementar trazabilidad completa, reanudación de procesos en caso de interrupciones, análisis de fallos y generación de reportes operativos. Su integración con la interfaz web facilita la consulta de este historial por parte del operador en tiempo real o posterior al proceso.

16.4 Núcleo de Integración

16.4.1 Dispositivo Embebido

En el marco de esta tesis, para este núcleo se eligió la Raspberry Pi 4 como plataforma de integración del sistema de telegestión debido a que este dispositivo embebido presenta un excelente equilibrio entre rendimiento, costo y versatilidad, lo que la posiciona como una opción estratégica frente a otros dispositivos del ecosistema embebido. Con un procesador Broadcom BCM2711 de cuatro núcleos Cortex-A72 a 1.5 GHz, memoria RAM de hasta 8 GB, puertos USB 3.0, doble salida de video 4K y conectividad avanzada (Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac y Bluetooth 5.0), ofrece capacidades suficientes para ejecutar tareas de procesamiento intensivo, visualización en tiempo real y conectividad remota. A diferencia de alternativas como Arduino (orientado al control básico sin sistema operativo), BeagleBone Black (con menor soporte comunitario) o Jetson Nano (más costoso y especializado en IA), la Raspberry Pi 4 permite el desarrollo y despliegue de sistemas complejos con mayor facilidad gracias a su compatibilidad con sistemas operativos completos como Raspberry Pi OS o Ubuntu. Por estas razones, se justifica su elección como núcleo de la arquitectura propuesta, especialmente en escenarios que requieren consulta, monitoreo y control de múltiples dispositivos embebidos en entornos industriales o de automatización avanzada.

Con este dispositivo se pueden atender las funcionalidades descritas en el apartado de diseño y que están relacionadas con los siguientes aspectos

16.4.2 Comunicación entre Sistemas Externos e Internos

Aquí confluyen los escenarios de transmisión de datos RS232 a los a

16.4.3 Interoperabilidad

El sistema integra diversidad de tecnologías a nivel de sensores, actuadores y demás elementos haciendo y creado un escenario interoperable. Se hicieron múltiples scripts en Python para generar la interoperabilidad de los subsistemas y los núcleos descritos .

- Asegura la interoperabilidad entre tecnologías diversas, permitiendo que el sistema se conecte con diferentes plataformas o dispositivos sin problemas de compatibilidad.
- Facilita la integración de nuevos dispositivos y sistemas que se añaden al ecosistema sin necesidad de reconfigurar el sistema central.
- Permite conectar el sistema con tecnologías de terceros sin conflictos de compatibilidad.

16.4.4 Facilita el Control Remoto

Una vez se ha descrito en su totalidad la implementación de la solución de ingeniería para el

sistema de telegestión denominado SIMCNC, a continuación se presenta la arquitectura de despliegue de la plataforma la cual contempla todos los elementos de diseño y desarrollo que se ha realizado para esta tesis grado.

16.5 Integración Funcional entre Subsistemas

El sistema propuesto se estructura bajo una arquitectura modular con interoperabilidad funcional entre subsistemas. Esta integración no solo permite la modularización funcional de tareas, sino que asegura la coordinación operativa para una respuesta adaptativa ante condiciones dinámicas del entorno CNC. A continuación, se describen las relaciones funcionales más relevantes entre los módulos del sistema:

- **Subsistema de Tolerancia a Fallos y Subsistema de Notificaciones y Alertas:**

El mecanismo de tolerancia a fallos se apoya en un sistema de análisis continuo de variables críticas (como temperatura y consumo de corriente) para la identificación de condiciones anómalas. Ante la detección de eventos fuera de los umbrales definidos, este módulo comunica las incidencias al subsistema de notificaciones, que se encarga de generar alertas automáticas a través de medios programados (SMS, correo electrónico o llamadas). Esta relación funcional garantiza una **escalabilidad reactiva** y una **respuesta inmediata** ante potenciales fallos eléctricos, térmicos o de operación.

- **Subsistema de Monitoreo y Sistema de Registro de Producción:**

Los datos adquiridos por los sensores conectados al sistema embebido son estructurados y transmitidos en tiempo real al servidor central, donde son almacenados en una base de datos relacional. Esta información histórica no solo respalda la trazabilidad de los procesos, sino que habilita funciones analíticas orientadas a la **optimización del desempeño**, detección de tendencias y soporte para mantenimiento predictivo.

- **Sistema de Visualización en Tiempo Real e Interfaz Web de Control:**

La integración del flujo de video proveniente del módulo ESP32-CAM dentro de la interfaz web permite al operador realizar tareas de inspección visual remota en paralelo con el envío de comandos G-code. Este acoplamiento entre visualización y control remoto refuerza las capacidades de supervisión contextualizada, y establece las bases para la incorporación futura de algoritmos de visión computacional o IA.

- **Interfaz Web y Subsistema de Notificaciones:**

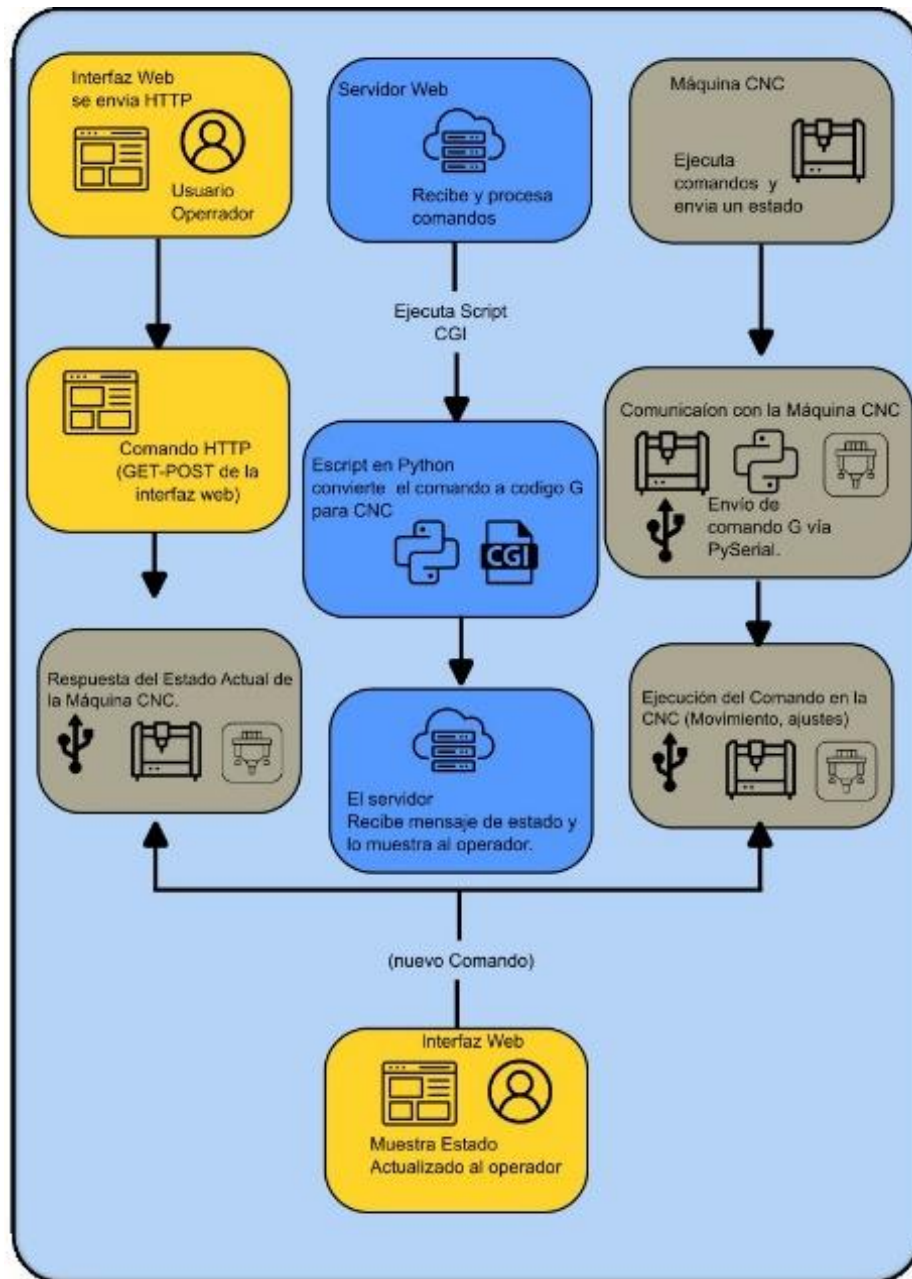
La interfaz web proporciona herramientas para la configuración y administración del sistema de alertas, permitiendo al usuario definir parámetros de activación, niveles de criticidad, destinatarios y modos de notificación. Esta capacidad de ajuste dinámico otorga flexibilidad operativa y facilita la adaptación del sistema a distintos escenarios industriales o políticas de seguridad.

La integración funcional entre los subsistemas constituye un eje estructural del diseño, donde la comunicación entre módulos garantiza la coherencia operativa, la resiliencia ante fallos y la eficiencia en la toma de decisiones, asegurando así la robustez del sistema de telegestión en entornos CNC industriales.

- **Comandos HTTP:** Cuando el operador envía un comando desde la interfaz web (como mover un eje o cambiar la velocidad), la solicitud se envía al servidor web en forma de un comando HTTP (GET o POST).
- **Procesamiento en el Servidor Web:** El servidor ejecuta un script CGI escrito en Python 3 que recibe y procesa la solicitud del usuario. Este script convierte el comando recibido en un formato adecuado para la máquina CNC (por ejemplo, un código G para mover un eje).
- **Comunicación con la CNC:** El servidor envía el comando a la máquina CNC a través del puerto USB (usando la biblioteca PySerial). Los comandos pueden ser instrucciones de movimiento de los ejes, ajustes de velocidad o inicio de procesos de fresado, entre otros.
- **Ejecución de Comandos:** Una vez que la máquina CNC recibe el comando, lo ejecuta y envía una respuesta al servidor, indicando el estado actualizado de la máquina (por ejemplo, la nueva posición de los ejes). Esta respuesta es capturada por el servidor y mostrada al usuario en la interfaz web.

La figura (ver Figura 12) , muestra gráficamente este flujo de información, desde que el operador emite una instrucción en la interfaz web hasta que la máquina CNC ejecuta el comando y retorna el estado actualizado.

Figura 12. Esquema del funcionamiento del control CNC vía HTTP.

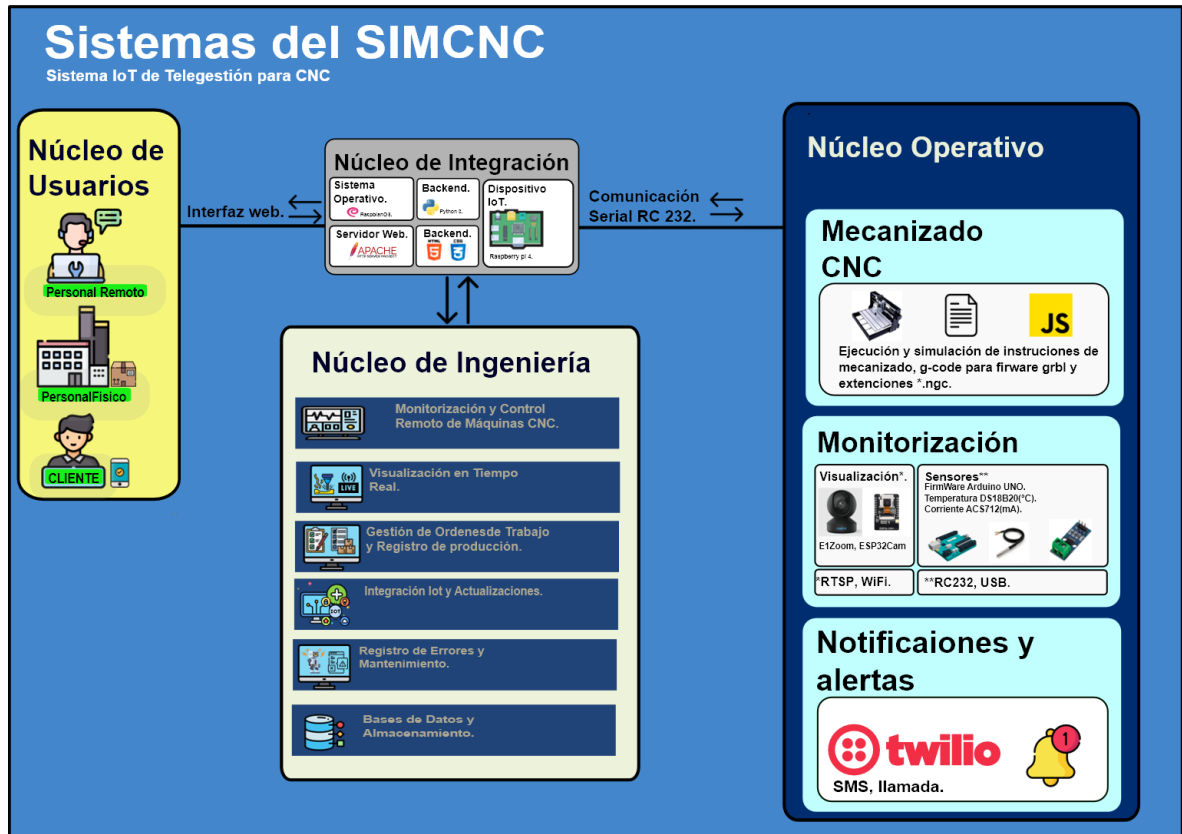


Fuente: Elaboración propia.

16.6 Diagrama General de implementación

A continuación y luego de todo lo descrito se alinea el diseño con la implementación realizada en este capítulo y se muestra la figura (ver Figura 13) de la arquitectural sistema SIMCNC.

Figura 13. Diagrama general de implementación del SIMCNC.



Fuente: Elaboración propia.

La figura (ver Figura 13) anterior, presenta el diagrama general de la implementación del sistema **SIMCNC** (Sistema IoT de Telegestión para CNC), el cual integra los componentes funcionales necesarios para garantizar la supervisión y el control remoto de máquinas CNC de tres ejes. En el centro del esquema se encuentra una Raspberry Pi, que cumple el rol de servidor local, actuando como nodo de integración entre la interfaz web, los usuarios y los procesos operativos.

A la izquierda del diagrama se representan los diferentes usuarios del sistema, que pueden ser personal remoto, personal físico en planta o clientes, quienes acceden mediante una interfaz web. Esta interfaz permite el control, monitoreo y visualización remota del estado de la máquina y sus variables críticas.

A la derecha de la imagen se presenta el núcleo operativo el cual muestra y evidencia los procesos descritos con anterioridad

16.7 Conclusiones Parciales

El Núcleo de Ingeniería del sistema SIMCNC se presenta como el componente central que integra las funciones de control, monitoreo y gestión de las máquinas CNC. La capacidad de monitoreo y control remoto del sistema permite a los operadores interactuar con las máquinas

desde cualquier ubicación, gracias a la implementación de una infraestructura basada en servidores web y scripts Python que comunican en tiempo real el estado de las máquinas. Esta flexibilidad mejora significativamente la eficiencia y la capacidad de respuesta ante eventos imprevistos.

Además, el sistema de visualización en tiempo real, utilizando cámaras de monitoreo y protocolos RTSP, ofrece una supervisión visual continua que contribuye a la detección temprana de posibles fallos o condiciones inseguras durante el proceso de mecanizado. La integración de la visión por computador e inteligencia artificial en fases posteriores promete optimizar aún más la supervisión y control del proceso.

Por otro lado, el subsistema de gestión de órdenes de trabajo y registro de producción garantiza la trazabilidad completa de los procesos, almacenando información detallada que facilita el análisis y la mejora continua. Esto también se ve reforzado por el subsistema de registro de errores y mantenimiento, que permite la gestión proactiva de posibles fallos, aumentando la fiabilidad operativa y extendiendo la vida útil del equipo.

Finalmente, el subsistema de integración IoT y actualizaciones asegura que el sistema SIMCNC pueda adaptarse a nuevas tecnologías y necesidades operativas sin comprometer su rendimiento, permitiendo una evolución constante en un entorno industrial cada vez más automatizado.

El Núcleo de Comunicación desempeña un papel esencial en asegurar la conectividad entre todos los elementos del sistema, tanto a nivel local como remoto. La configuración de red y la comunicación segura a través de protocolos estándar (HTTP, MQTT, RTSP) garantizan que el sistema se mantenga accesible de manera confiable desde diferentes ubicaciones, lo que facilita tanto la supervisión como el control remoto de las máquinas.

La capacidad de integrar dispositivos y sistemas externos mediante interfaces abiertas asegura una interoperabilidad fluida, eliminando los posibles conflictos de compatibilidad que podrían surgir al conectar nuevos dispositivos al sistema. Esto también permite que el sistema SIMCNC se expanda de manera sencilla para incluir nuevas tecnologías o servicios sin interrumpir su funcionamiento actual, lo cual es una ventaja clave en entornos industriales que requieren una continua optimización.

El Núcleo de Integración, basado en una Raspberry Pi 4, se erige como la plataforma ideal para gestionar la interacción entre los diversos subsistemas, dada su potente capacidad de procesamiento, versatilidad y compatibilidad con sistemas operativos completos. Esta elección facilita la implementación de soluciones complejas a un costo accesible, siendo una opción eficiente frente a otras alternativas de hardware.

Además, la arquitectura modular de SIMCNC asegura que nuevos dispositivos o servicios puedan ser fácilmente integrados sin la necesidad de reconfigurar el sistema central. Esto también garantiza que el sistema sea escalable y adaptable a las cambiantes necesidades del entorno industrial, lo que resulta crucial para el mantenimiento de un flujo de trabajo continuo y optimizado.

La integración exitosa de diversas tecnologías de sensores, actuadores y sistemas de control demuestra que el sistema SIMCNC no solo es capaz de operar eficazmente, sino que también

está diseñado para evolucionar conforme a los avances en la automatización industrial, consolidándose como una plataforma adaptable a los principios de la Industria 4.0.

17 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE PRUEBAS QUE PERMITAN EVIDENCIAR LA CALIDAD DE FABRICACIÓN DE PIEZAS MECANIZADAS.

En este capítulo se aborda el diseño y la ejecución de escenarios de prueba orientados a evaluar la calidad de las piezas mecanizadas obtenidas mediante el sistema CNC desarrollado. Para ello, se definen criterios claros de calidad, se identifican las variables críticas del proceso y se establecen metodologías para fabricar las piezas, recolectar datos y evaluar los resultados. El objetivo principal es evidenciar mediante pruebas concretas el desempeño y la precisión del sistema en la fabricación de piezas, garantizando que cumplan con las especificaciones requeridas.

- **Definición de criterios de calidad para las piezas mecanizadas:**

Para evaluar de manera objetiva la calidad de las piezas fabricadas, es fundamental establecer criterios medibles y claros. En este proyecto, los criterios de calidad definidos se basan en aspectos geométricos, dimensionales y de acabado superficial, propios del mecanizado en madera con fresas de tungsteno. Estos criterios incluyen:

- **Precisión dimensional:**

Las dimensiones finales de las piezas se comparan con las medidas especificadas en el archivo .ngc, las cuales están expresadas en milímetros. Para esto, se toma la medida física de la pieza terminada y se calcula la diferencia respecto al diseño digital. En las pruebas realizadas, se obtuvo un error promedio de 0.041 mm, valor que se determinó descontando la anchura de la broca (0.1 mm) y dividiendo ese valor en dos, para compensar el efecto del diámetro de corte sobre la dimensión final. Esta precisión está dentro de la tolerancia aceptable para aplicaciones mecánicas y garantiza que las piezas pueden encajar o funcionar correctamente en su uso previsto.

- **Acabado superficial:**

Se evalúa la textura y rugosidad de la superficie mecanizada, buscando un acabado suave que minimice la necesidad de procesos de post acabado. La ausencia de marcas profundas, rebabas o irregularidades visibles es un indicador de calidad.

- **Ausencia de defectos visibles:**

No deben presentarse quemaduras, astillamientos o daños en la pieza causados durante el proceso de corte.

- **Consistencia entre piezas:** Cuando se fabrican lotes o series, las piezas deben mantener uniformidad en sus dimensiones y acabados, indicando estabilidad del proceso.

17.1 Identificación de las variables críticas del proceso CNC

El proceso de mecanizado por control numérico computarizado (CNC) involucra múltiples variables que influyen directamente en la calidad de las piezas mecanizadas. Identificar y controlar estas variables es fundamental para diseñar escenarios de prueba que permitan evaluar de forma objetiva el desempeño del sistema y la calidad final de las piezas producidas.

En este proyecto, las variables críticas consideradas y monitoreadas mediante la plataforma desarrollada son las siguientes:

- **Velocidad del husillo (rpm):** La velocidad de rotación del husillo, que oscila entre 200 y 10,000 rpm, afecta la potencia de fresado y el comportamiento térmico durante el corte. Ajustar adecuadamente esta variable es crucial para obtener un mecanizado eficiente y un acabado superficial de calidad.
- **Avance por revolución (f):** Esta variable determina el desplazamiento lineal de la herramienta por cada vuelta del husillo. Valores adecuados permiten mantener la precisión dimensional y evitar defectos como rebabas o irregularidades.
- **Profundidad de pasada (ap):** Indica la cantidad de material removido en cada pasada. Una profundidad apropiada evita esfuerzos mecánicos excesivos y garantiza la estabilidad del proceso.
- **Tipo de herramienta de corte:** Se emplearon fresas de tungsteno, que ofrecen alta resistencia al desgaste y permiten un acabado consistente en el mecanizado de madera.
- **Material mecanizado:** Se utilizó madera con un grosor de 5 mm, cuyas propiedades físicas condicionan los parámetros óptimos de corte para preservar la calidad superficial y dimensional.
- **Parámetros monitoreados mediante sensores IoT:**
 - **Corriente eléctrica:** El consumo de corriente del motor es un indicador indirecto de la carga de trabajo y la estabilidad del proceso. Fluctuaciones anómalas pueden reflejar condiciones de corte irregulares.
 - **Temperatura:** La medición de temperatura en la herramienta o husillo ayuda a detectar sobrecalentamientos que puedan afectar la integridad del mecanizado o la vida útil de la herramienta.
- **Observación visual en tiempo real:** Mediante una cámara configurada para transmitir vídeo por RTSP, se supervisa el proceso de fresado para detectar visualmente cualquier evento que pueda comprometer la calidad, como interrupciones, desplazamientos o errores en el mecanizado.

Estas variables críticas constituyen el fundamento para la planificación y ejecución de los escenarios de prueba, permitiendo correlacionar condiciones específicas de operación con la calidad de las piezas mecanizadas. La plataforma integrada facilita la captura continua y el análisis de datos, aportando un soporte robusto para la toma de decisiones en la mejora y control del proceso CNC.

17.2 Diseño de los escenarios de prueba

El diseño de los escenarios de prueba se realiza con el propósito de evaluar sistemáticamente cómo las variables críticas del proceso CNC afectan la calidad de las piezas mecanizadas. Para ello, se establecen condiciones controladas y repetibles que permitan obtener resultados cuantificables y comparables, facilitando la identificación de parámetros óptimos y la detección de posibles fallas.

Se seleccionaron rangos específicos para variables críticas como la velocidad del husillo,

avance por revolución y profundidad de pasada. Estas variables se ajustaron en diferentes combinaciones para simular condiciones reales y extremas del proceso de fresado. Para eliminar variaciones externas, se utilizó madera de 5 mm de grosor y fresas de tungsteno, asegurando que las diferencias observadas se debieran únicamente a las condiciones del proceso.

Para evidenciar el comportamiento bajo diferentes niveles de complejidad de mecanizado, se fabricaron tres piezas con distinta complejidad geométrica: una silueta de caballo (alta complejidad), un engranaje dentado (complejidad media) y un círculo simple (baja complejidad). Todas las piezas fueron fresadas sobre láminas de madera, permitiendo evaluar la influencia del diseño en la calidad de fabricación.

Durante cada escenario, se monitorearon en tiempo real la corriente y temperatura mediante sensores ACS712 y AD18B20, así como la temperatura de los drivers A4988. La supervisión visual del proceso se realizó mediante una cámara con transmisión RTSP, documentando el mecanizado para detectar eventos anómalos o errores en la ejecución.

Finalizado el mecanizado, se midieron las dimensiones de las piezas terminadas y se compararon con las especificaciones del archivo .ngc (ver Tabla 7). El error dimensional promedio registrado fue de 0.041 mm, descontando la anchura de la broca de 0.1 mm y dividiendo en dos, evidenciando una buena precisión del proceso.

Tabla 7. Ejemplo de escenarios de prueba diseñados.

Escenario	Velocidad husillo (rpm)	Avance por revolución (mm)	Profundidad de pasada (mm)
1	2000	0.05	1
2	5000	0.10	2
3	8000	0.15	3

Fuente: Elaboración propia.

Cada escenario se repitió varias veces para asegurar la repetibilidad y trazabilidad de los resultados.

- Pruebas de Mecanizado Y Evidencia de Resultados

Como parte del desarrollo y verificación de la plataforma, se realizaron pruebas de mecanizado mediante un archivo G-code predefinido, representando una pieza genérica de producción continua, común en entornos industriales. A continuación, se describen el flujo de trabajo y los resultados de las pruebas:

17.2.1 Generación y Procesamiento del Archivo G-code

El archivo G-code utilizado (newgc_archivo.hgc) se genera y procesa mediante el script (nodifielndngc.py). Este script elimina comentarios y caracteres no necesarios en el archivo

asegurando que el G-code esté optimizado para la comunicación con la máquina CNC. Durante este procesamiento, también se valida la integridad del archivo y se guarda una versión filtrada lista para mecanizado.

17.2.2 Envío del G-code a la Máquina CNC

El script `sendgcode.py` se encarga de transmitir el código G (G-code) a una máquina CNC a través de un puerto serial previamente configurado. La conexión se realiza mediante el puerto `/dev/ttyUSB0`, con una velocidad de 115200 baudios, y sigue un protocolo de comunicación secuencial: cada línea del archivo G-code se envía una tras otra.

El script incorpora mecanismos de reintento y verificación de respuestas (como “ok” o “error”) para garantizar que las instrucciones se ejecuten correctamente. Además, monitorea y registra la respuesta de la máquina para cada línea enviada, lo que permite detectar posibles fallos y aplicar medidas correctivas oportunas.

17.3 Resultados de las Pruebas

Las pruebas de mecanizado demostraron que la máquina CNC ejecuta las instrucciones del archivo G-code con alta precisión. Aunque se observó un ligero retardo en la respuesta durante algunas operaciones, el mecanizado de la pieza se completó exitosamente, lo que evidencia que el sistema de comunicación y control funcionó de manera efectiva.

Para documentar los resultados, se capturaron fotografías tanto del proceso de mecanizado como del producto final. Estas imágenes ilustran la ejecución precisa de las instrucciones enviadas mediante G-code y muestran los ajustes realizados en tiempo real para optimizar el flujo de trabajo. Asimismo, proporcionan una referencia visual del acabado de la pieza y de la calidad del mecanizado, reafirmando la efectividad del sistema.

Este registro visual de los mecanizados generados mediante el envío de instrucciones G-code, gestionado por el script, ofrece evidencia clara de los resultados obtenidos. Además, respalda la posibilidad de mejorar el tiempo de respuesta y de implementar ajustes futuros en la velocidad de procesamiento y en la interfaz de control de la máquina.

- Pruebas Físicas y Documentación Gráfica

Para respaldar los resultados obtenidos, se documentaron de manera visual el proceso de mecanizado como la pieza final producida. Las fotografías tomadas durante las diferentes etapas del mecanizado incluyen:

- Fotografías del proceso de mecanizado:

Estas imágenes capturan la máquina CNC en acción, mostrando la interacción entre las herramientas de corte y el material, así como las distintas fases del trabajo de mecanizado (inicio, terminación y final). En estas fotos se observa la precisión en la ejecución de cada operación, la exactitud con que la máquina sigue las trayectorias definidas por el G-code y la estabilidad del proceso durante su desarrollo.

En la figura (ver Figura 14), es una captura del G-code enviado y confirmación de ejecución por parte de la máquina CNC, se muestra un ejemplo representativo del proceso de control: el código enviado desde la interfaz y la respuesta “ok” por parte de la CNC, indicando que la instrucción fue recibida correctamente. Esta retroalimentación es esencial para validar la sincronización y ejecución efectiva de los comandos en tiempo real.

Figura 14. Envío de G-code a la máquina.

```
pi@raspberrypi:/var/www/html/CNCproject $ python3 modifiendngc.py
Archivo procesado y guardado como: newngc_grear_0001.ngc
Enviando línea: M3
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: M3
Enviando línea: G21
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G21
Enviando línea: G00 Z5.000000
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G00 Z5.000000
Enviando línea: G00 X21.529287 Y37.728303
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G00 X21.529287 Y37.728303
Enviando línea: G01 Z-0.300000 F200.0
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G01 Z-0.300000 F200.0
Enviando línea: G03 X18.935416 Y37.609373 Z-0.300000 I0.000000 J-28.345721 F180.000000
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X18.935416 Y37.609373 Z-0.300000 I0.000000 J-28.345721 F180.000000
Enviando línea: G03 X16.826005 Y37.278714 Z-0.300000 I1.531032 J-16.660855
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X16.826005 Y37.278714 Z-0.300000 I1.531032 J-16.660855
Enviando línea: G03 X11.252000 Y35.224966 Z-0.300000 I4.848903 J-21.751214
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X11.252000 Y35.224966 Z-0.300000 I4.848903 J-21.751214
Enviando línea: G03 X6.691534 Y31.917107 Z-0.300000 I9.385986 J-17.737865
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X6.691534 Y31.917107 Z-0.300000 I9.385986 J-17.737865
Enviando línea: G03 X4.605143 Y29.512685 Z-0.300000 I12.623551 J-13.061267
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X4.605143 Y29.512685 Z-0.300000 I12.623551 J-13.061267
Enviando línea: G03 X3.030600 Y26.864590 Z-0.300000 I13.799511 J-9.997270
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X3.030600 Y26.864590 Z-0.300000 I13.799511 J-9.997270
Enviando línea: G03 X1.920764 Y23.636217 Z-0.300000 I13.445016 J-6.427025
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X1.920764 Y23.636217 Z-0.300000 I13.445016 J-6.427025
Enviando línea: G03 X1.529296 Y20.031115 Z-0.300000 I16.404327 J-3.605102
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X1.529296 Y20.031115 Z-0.300000 I16.404327 J-3.605102
Enviando línea: G03 X1.920693 Y16.425308 Z-0.300000 I16.805262 J-0.000000
Respuesta de la máquina: ok
Línea enviada correctamente: G03 X1.920693 Y16.425308 Z-0.300000 I16.805262 J-0.000000
```

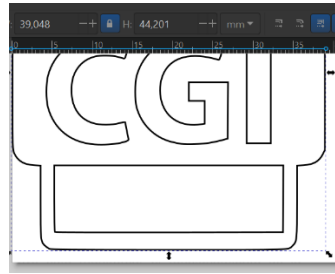
Fuente: Elaboración propia.

- Fotografía del Producto Final:

Una vez completado el mecanizado, se realizaron fotografías detalladas de la pieza final, las cuales permiten evaluar la calidad del acabado superficial, la precisión en las dimensiones y la conformidad con el diseño especificado en el G-code. Estas imágenes se comparan con las expectativas previas y sirven como evidencia tangible de que el sistema de control y la máquina CNC cumple con los estándares de calidad requeridos para un proceso de mecanizado industrial.

En la figura (ver Figura 15), se presenta el diseño original que fue utilizado como base para la programación del proceso de mecanizado, sirviendo como referencia inicial para la comparación con el producto obtenido.

Figura 15. Imagen de programa de diseño.



Fuente: Elaboración propia.

Además de las fotografías, se utilizaron herramientas de medición digital para verificar las dimensiones y la geometría de las piezas, corroborando la fidelidad con el diseño previsto. Estas mediciones también proporcionaron una referencia adicional para la interpretación de los resultados obtenidos en el proceso de mecanizado.

La figura (ver Figura 16), muestra el producto mecanizado final junto con el proceso de medición digital, validando visual y dimensionalmente la precisión del sistema.

Figura 16. Imagen trabajo final y medición.



Fuente: Elaboración propia.

- Conclusiones.

A través de las pruebas realizadas, se ha comprobado que el sistema de comunicaciones y control basado en el envío de archivos G-code hacia la máquina CNC funciona de manera efectiva y con un alto grado de precisión. Los resultados de las pruebas demuestran que:

- Precisión en el Mecanizado:

El proceso de mecanizado ejecutado a través del G-code generado y enviado por los scripts mostró una ejecución precisa de las instrucciones, logrando un acabado adecuado y dentro de las tolerancias especificadas.

La figura (ver Figura 17), presenta una muestra visual de las piezas trabajadas, ilustrando cómo el sistema responde a diferentes niveles de dificultad en el diseño, manteniendo

consistencia y fidelidad en cada ejecución.

Figura 17. Resultados de mecanizado por nivel de complejidad.



Fuente: Elaboración propia.

- Optimización de la Transmisión de G-code

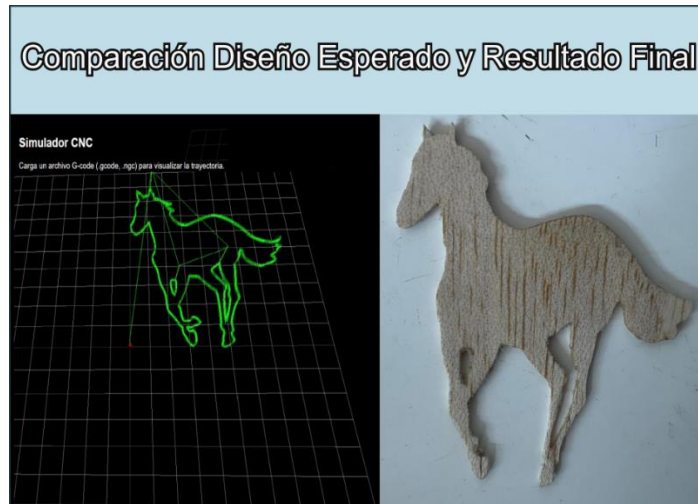
En un principio, el script de transmisión de G-code gestionó exitosamente la comunicación con la máquina CNC, pero debido al envío continuo y sin pausas de las órdenes, la máquina no pudo procesar todas las instrucciones a la velocidad esperada, lo que resultó en un retraso en las respuestas. El servidor seguía enviando las instrucciones sin esperar que la máquina las ejecutara completamente. Para resolver este problema, se implementó un tiempo de espera mayor entre el envío de cada línea de G-code, lo que permitió a la máquina procesar cada instrucción de manera efectiva sin pérdida de datos. Este ajuste mejoró significativamente la precisión y el tiempo de respuesta del sistema, asegurando que todas las instrucciones fueran ejecutadas correctamente. (incluir captura de pantalla o diagrama del monitor que ilustre como se gestionan los tiempos de espera y las respuestas de la máquina).

- Calidad del Producto Final:

Las fotografías del producto final y las mediciones realizadas indican que la calidad del mecanizado es alta, con una precisión aceptable en las dimensiones mantiene la precisión aceptable en un entorno industrial.

La figura (ver Figura 18), muestra la comparación visual entre el modelo digital simulado y la pieza mecanizada, evidenciando la correspondencia entre ambos y respaldando la precisión del sistema implementado.

Figura 18. Simulación digital vs resultado mecanizado.



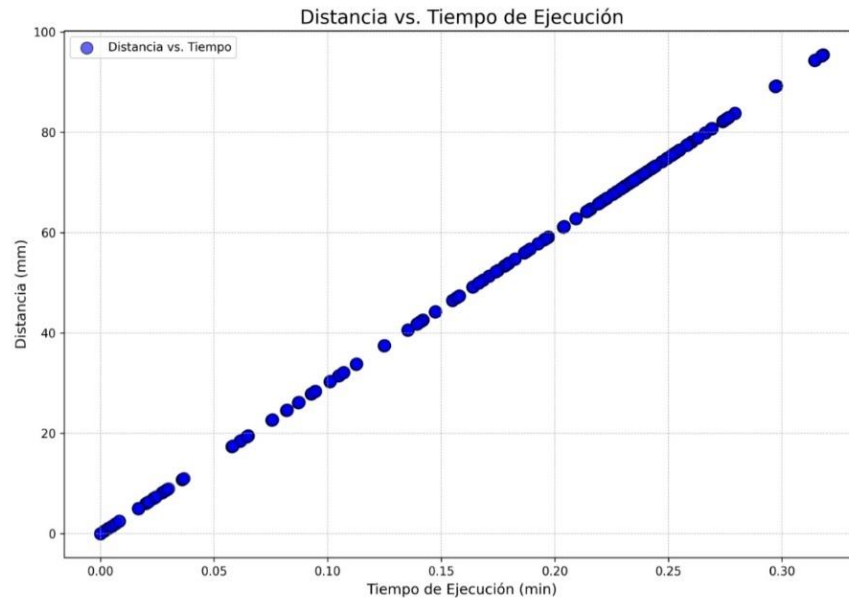
Fuente: Elaboración propia.

- Oportunidades de Mejora:

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, se identificaron áreas de mejora, particularmente en los tiempos de respuesta y la optimización de la velocidad de procesamiento de las instrucciones como se ve en la figura (ver Figura 19), donde se observa una gracia de dispersión, que relaciona el tiempo y la distancia que toma cada instrucción de g-code. En futuras iteraciones, se podría realizar ajustes en la programación del G-code o en el ajuste de parámetros de la máquina para mejorar la eficiencia del proceso.

Figura 19. Tiempo vs distancia de g-code.

Reporte de Análisis CNC
Proyecto de Investigación: CNC
Instituto de Ingeniería (II) del ITAM y UNAM



Fuente: Elaboración propia.

17.4 Conclusiones Parciales

Las pruebas realizadas permitieron validar la efectividad del sistema CNC desarrollado para la fabricación de piezas mecanizadas en madera. Se establecieron criterios de calidad claros y medibles, obteniendo resultados dentro de tolerancias industriales aceptables (error promedio: 0.041 mm). La identificación y control de variables críticas del proceso (velocidad del husillo, avance, profundidad de pasada, entre otras) fueron fundamentales para garantizar la precisión y consistencia del mecanizado.

El sistema demostró capacidad para ejecutar instrucciones G-code de manera precisa, con buena estabilidad operativa. La implementación de sensores IoT y monitoreo visual permitió un control en tiempo real del proceso, mejorando la trazabilidad y detección de anomalías. Se identificaron oportunidades de mejora en la optimización del envío del G-code, lo que se resolvió eficazmente mediante ajustes en los tiempos de espera.

Finalmente, las pruebas con piezas de distintas complejidades confirmaron que el sistema mantiene un buen desempeño, tanto en precisión dimensional como en calidad superficial, consolidándose como una solución funcional y ajustable a diferentes escenarios de mecanizado.

18 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA DE TELEGESTIÓN Y MONITORIZACIÓN IMPLEMENTADO PARA AFIANZAR LOS PROCESOS DE DESPLIEGUE DE LOS EMPRENDIMIENTOS BASADOS EN ESTA TÉCNICA DE PIEZAS MECANIZADAS.

En el siguiente capítulo se analizarán los resultados obtenidos del sistema de telegestión y monitorización implementado, el cual fue desarrollado con el objetivo de afianzar los procesos de despliegue de emprendimientos centrados en la fabricación de piezas mecanizadas mediante técnicas digitales. Este análisis busca examinar cómo la integración de tecnologías IoT, comunicación remota y visualización en tiempo real incide directamente en la eficiencia operativa, la toma de decisiones y la escalabilidad de modelos de negocio basados en maquinaria CNC.

El sistema permite la gestión remota de archivos G-code, el control del proceso de mecanizado desde ubicaciones externas y la supervisión continua del estado funcional de la máquina, integrando herramientas que aportan trazabilidad, autonomía y capacidad de respuesta. Estos elementos se han probado en escenarios controlados y funcionales, permitiendo evidenciar su desempeño técnico, su impacto en los tiempos de operación, y su viabilidad como solución de soporte para emprendimientos tecnológicos en el ámbito de la manufactura avanzada.

Este capítulo detalla los resultados más relevantes, evidenciando tanto los logros alcanzados como los aspectos susceptibles de mejora, con base en una evaluación crítica del sistema en condiciones reales de uso. La finalidad es demostrar cómo este tipo de desarrollos pueden contribuir a consolidar proyectos emprendedores con enfoque industrial, alineados con las exigencias de la industria 4.0.

18.1 Generación y Envío de G-code

Se implementó un sistema para la creación y optimización de archivos G-code, el cual se procesa y transmite a la máquina CNC mediante un script automatizado. Este script garantiza que las instrucciones sean enviadas de manera eficiente y precisa, asegurando que la máquina ejecute las operaciones de mecanizado conforme a lo especificado. Sin embargo, durante las pruebas iniciales, se observó que el servidor enviaba las órdenes a la máquina sin dar tiempo suficiente para su ejecución, lo que causaba fallos en el proceso. Este problema fue corregido mediante la implementación de un retraso entre el envío de las instrucciones, permitiendo que la máquina las procesara correctamente.

18.2 Comunicación Remota y Gestión de Usuarios

La plataforma fue diseñada para ser completamente accesible de manera remota desde cualquier lugar, a través de una interfaz web. Además, se implementó un sistema de gestión de usuarios, garantizando que solo personal autorizado pueda acceder y controlar las operaciones de la máquina CNC. Lo que permitió una mayor flexibilidad en la operación y el monitoreo de los procesos de mecanizado.

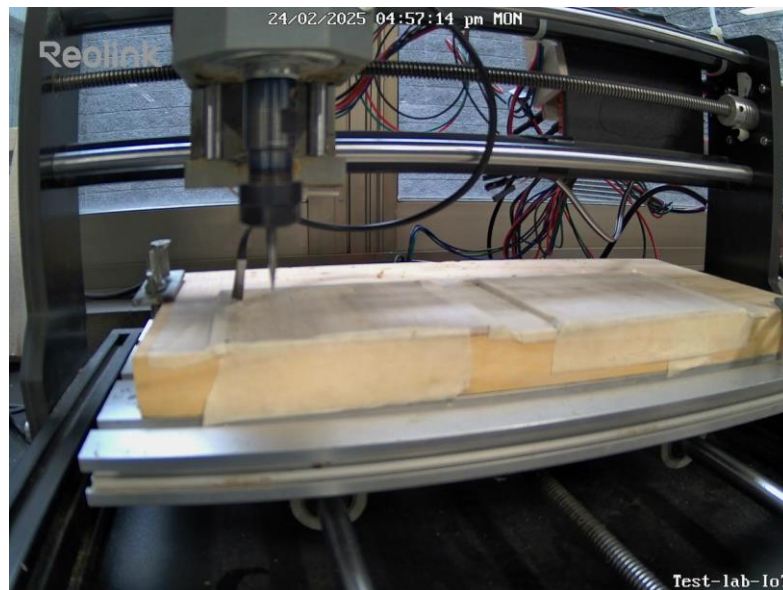
18.3 Monitorización en Vivo

Un aspecto clave de la plataforma es el visor en vivo que permite a los usuarios observar el

proceso de mecanizado en tiempo real. Esto no solo proporciona una vista directa de la máquina mientras opera, sino que también permite una acumulación de errores o vigilar el desgaste de las herramientas. Este componente es fundamental para asegurar la calidad y la precisión durante la operación.

A continuación, se muestra la figura(ver Figura 20), que ilustra el visor en vivo utilizado para la monitorización en tiempo real del proceso de mecanizado.

Figura 20. Foto transmisión video RTSP.



Fuente: Elaboración propia.

18.4 Pruebas de Mecanizado

Las pruebas de mecanizado realizadas con la plataforma demostraron su capacidad para ejecutar las instrucciones del G-code con precisión. Las mediciones dentro de las tolerancias especificadas, con una calidad de acabado adecuada para la producción continua. Las imágenes del proceso de mecanizado también proporcionaron evidencia visual de la precisión y fiabilidad del sistema, respaldando su efectividad para la operación remota.

Aunque el sistema logró un funcionamiento adecuado, se identificaron algunas áreas de mejora. En particular, el tiempo de respuesta de la máquina podría optimizarse aún más, así como la Adicionalmente, la implementación de más ajustes en los parámetros de la máquina podría permitir una mayor personalización de los procesos de mecanizado, mejorando la flexibilidad y la adaptabilidad del sistema.

En conclusión, la plataforma desarrollada en esta tesis ofrece una solución efectiva para el control remoto de máquinas CNC, permitiendo a los usuarios, monitorización en tiempo real y gestión de usuarios abre nuevas posibilidades para la automatización de la producción industrial. Las mejores propuestas en términos de tiempo a un nivel aun mayos de eficiencia

y fiabilidad en entornos industriales de producción continua.

18.5 Pruebas Sistema Tolerante a Fallos CNC.

18.5.1 Introducción.

El presente apartado, perteneciente al capítulo de Conclusiones, tiene como objetivo describir las pruebas realizadas para validar el sistema tolerante a fallos en el Control Numérico Computarizado (CNC). Se detallan los procedimientos, criterios de aceptación, implementación de software y hardware, así como los resultados obtenidos para garantizar la operatividad y confiabilidad del sistema ante posibles fallos.

18.5.2 Objetivo de las Pruebas.

Las pruebas buscan verificar la capacidad del sistema CNC para continuar operando de manera segura y eficiente frente a fallos en sus componentes. Se evalúa la recuperación del sistema ante errores, su capacidad de detección de fallos y la implementación de mecanismos de mitigación.

18.5.3 Alcance.

Debido a limitaciones de tiempo y alcance, se logró implementar un sistema basado en dos Arduino UNO como firmware para la captura de señales de sensores ADC, transmitiendo los datos a un Raspberry Pi a través de un puerto serial a 9600 baudios (ttyACM). Los datos recopilados incluyen:

- Temperatura y corriente en los drivers de potencia de los motores.
- Corriente en cada motor.
- Corriente en la fuente de alimentación.

Estos datos fueron procesados por un programa encargado de imprimir y enviar código G al CNC basado en GRBL, registrando la información obtenida durante la ejecución de una orden de mecanizado. Posteriormente, se generaron gráficas con estos datos para su análisis. La implementación exitosa de la interfaz permitió un mejor manejo del flujo de ejecución, reduciendo los tiempos de espera de la máquina. Sin embargo, no se logró completar la totalidad del sistema tolerante a fallos, aunque se dejó una base sólida para su futura integración.

Tipos de Pruebas Realizadas:

- *Pruebas de Hardware*
- Implementación de sensores para monitorear temperatura y corriente.
- Validación de la transmisión de datos entre Arduino y Raspberry Pi.
- Evaluación del impacto en el rendimiento del CNC.
- *Pruebas de Software*
- Captura y almacenamiento de datos de sensores mediante el script printCNC.py.
- Ejecución del código G en el CNC basado en GRBL.
- Registro y procesamiento de datos en archivos CSV y HTML.
- *Pruebas de Comunicación de Datos*

- Transmisión de datos en tiempo real a 9600 baudios.
- Validación de la precisión y consistencia de los datos registrados.
- *Generación de Gráficas y Análisis de Datos*

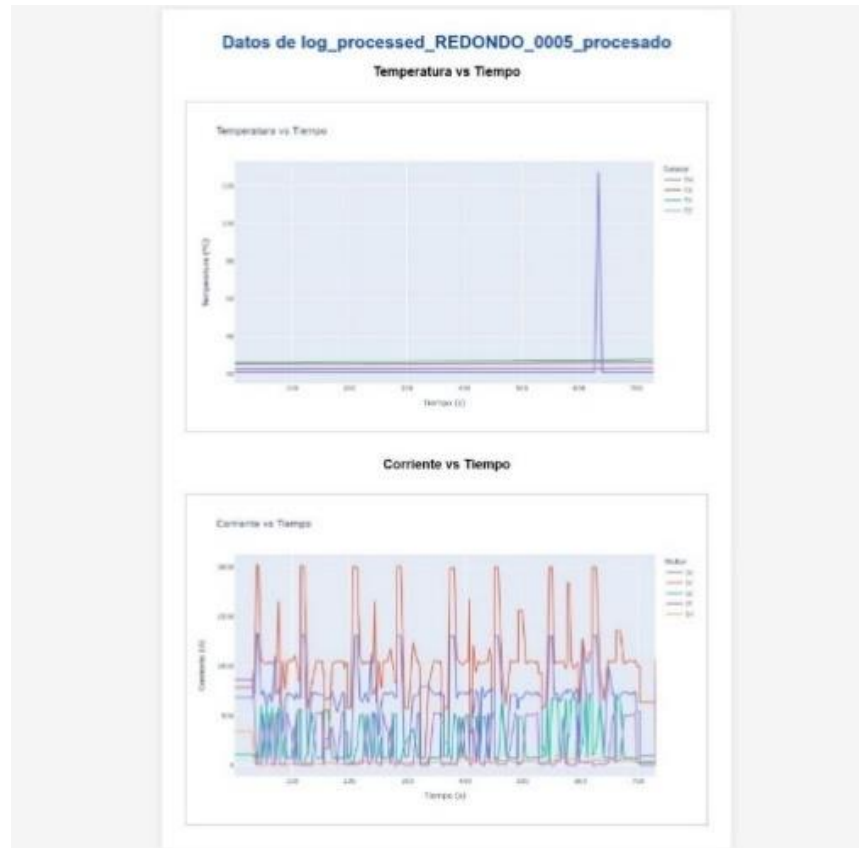
Para analizar el comportamiento del CNC y sus sensores, se generaron gráficas a partir de los datos registrados. El script CncGraphsWeb.py se encargó de:

- Limpiar los archivos CSV utilizando expresiones regulares para extraer correctamente la información (por ejemplo, temperatura de los sensores TH, TX, TY, TZ y corriente IT, IX, IY, IZ, IH).
- Generar gráficos interactivos de la evolución de la temperatura y la corriente a lo largo del tiempo usando Plotly.
- Guardar las gráficas en formato HTML, permitiendo su visualización inmediata y el análisis detallado de los datos obtenidos.

A modo de ejemplo, la siguiente captura de pantalla (ver) muestra cómo se visualizan los resultados de **Temperatura vs Tiempo** (gráfica superior) y **Corriente vs Tiempo** (gráfica inferior) para un archivo de datos procesado:

La figura (ver Figura 21), es una muestra de las gráficas generadas por CncGraphsWeb.py, mostrando la evolución de la temperatura (TH, TX, TY, TZ) y la corriente (IT, IX, IY, IZ, IH) en función del tiempo.

Figura 21. Gráficas generadas por CncGraphsWeb.py.



Fuente: Elaboración propia.

18.6 Flujo de Adquisición de Datos y Ejecución del G-Code

El sistema sigue el siguiente flujo para la captura de datos y la ejecución del G-code:

1. Adquisición de Datos:

- El script printCNC.py inicia hilos para leer datos en tiempo real desde los sensores conectados a los Arduinos (puertos /dev/ttyACM0 y /dev/ttyACM1).

2. Transmisión y Registro:

- Los datos se transmiten al Raspberry Pi vía comunicación serial y se registran en archivos CSV.

3. Ejecución del G-code:

- Se envían instrucciones de código G al CNC, permitiendo la ejecución de operaciones de mecanizado.

4. Visualización en Interfaz:

- La interfaz web muestra tablas con los datos y gráficas generadas, facilitando el monitoreo del proceso en tiempo real.

Las siguientes figuras ilustran la interfaz generada por el sistema. En la primera figura (ver Figura 22), se observa el encabezado de la página, correspondiente a la tabla de ejecución del G-code, donde se incluye el tiempo de ejecución por instrucción. La segunda muestra los datos adquiridos en tiempo real por los sensores de corriente y temperatura de los motores de la máquina, visualizados tanto en formato tabular como gráfico dentro de la plataforma web.

Figura 22. Encabezado de la página del proceso de impresión.

Proceso de impresión CNC				
Nro. Línea	Instrucción	Tiempo	A/C M0	A/C M1
1	G02 X3 Y0 Z0;Tiempo estimado: 0.100 segundos	0.1	°C, TX:25.19 °C, TY:26.06 °C, TZ:22.56	IT=863.458mA, IH=340.078mA, IX=683.885mA, IY=785.291mA, IZ=165.968mA
2	M3 S9000;Tiempo estimado: 0.100 segundos	0.1	A0=0, TH=21.06 °C, TX=25.19 °C, TY=26.06 °C, TZ=22.56	IT=863.458mA, IH=340.078mA, IX=683.885mA, IY=785.291mA, IZ=165.968mA
3	G21;Tiempo estimado: 0.100 segundos	0.1	A0=0, TH=21.06 °C, TX=25.19 °C, TY=26.06 °C, TZ=22.56	IT=863.458mA, IH=340.078mA, IX=683.885mA, IY=785.291mA, IZ=165.968mA
4	G00 Z5.000000;Tiempo estimado: 4.000 segundos	4.0	A0=0, TH=21.06 °C, TX=25.19 °C, TY=26.06 °C, TZ=22.56	IT=863.458mA, IH=340.078mA, IX=683.885mA, IY=785.291mA, IZ=165.968mA
5	G00 X14.145779 Y29.963042;Tiempo estimado: 26.508 segundos	26.508	A0=1, TH=21.06 °C, TX=25.19 °C, TY=26.06 °C, TZ=22.56	IT=863.458mA, IH=340.078mA, IX=683.885mA, IY=785.291mA, IZ=165.968mA
6	G01 Z-0.400000 F100.0;Tiempo estimado: 4.320 segundos	4.32	A0=1, TH=21.06 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=599.498mA, IH=14.807mA, IX=732.738mA, IY=1048.534mA, IZ=72.539mA
7	G03 X10.339495 Y29.254142 Z-0.400000 I0.845553 J-15.112976 F400.000000;Tiempo estimado: 3.007 segundos	3.087	A0=1, TH=21.06 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=10.935mA, IH=0.000mA, IX=1325.258mA, IY=2018.628mA, IZ=126.787mA
8	G03 X5.782479 Y27.545874 Z-0.400000 I4.403628 J-13.914196;Tiempo estimado: 3.157 segundos	3.157	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=19.023mA, IH=0.000mA, IX=1330.117mA, IY=2018.208mA, IZ=52.622mA
9	G03 X2.783285 Y23.703669 Z-0.400000 I0.421022 J-12.767407;Tiempo estimado: 4.437 segundos	4.437	A0=1, TH=21.06 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=19.445mA, IH=0.000mA, IX=708.549mA, IY=1057.647mA, IZ=600.963mA
10	G03 X9.471979 Y18.763182 Z-0.400000 I12.016294 J-8.635009;Tiempo estimado: 4.304 segundos	4.364	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=518.643mA, IH=0.000mA, IX=755.447mA, IY=1039.810mA, IZ=69.480mA
11	G03 X9.190267 Y12.519438 Z-0.400000 I14.712168 J-3.793372;Tiempo estimado: 5.007 segundos	5.007	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=17.181mA, IH=0.000mA, IX=595.898mA, IY=1029.831mA, IZ=562.404mA
12	G03 X2.439933 Y6.758567 Z-0.400000 I14.601645 J2.395101;Tiempo estimado: 4.941 segundos	4.941	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=528.529mA, IH=10.082mA, IX=729.936mA, IY=1043.928mA, IZ=69.888mA
13	G03 X7.819535 Y2.286554 Z-0.400000 I12.771547 J8.423700;Tiempo estimado: 5.127 segundos	5.127	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=13.578mA, IH=0.000mA, IX=831.248mA, IY=1026.161mA, IZ=563.679mA
14	G03 X12.915457 Y0.107262 Z-0.400000 I7.892740 J12.430319;Tiempo estimado: 5.038 segundos	5.03	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.12 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=0.000mA, IH=0.000mA, IX=1104.151mA, IY=1048.637mA, IZ=71.361mA
15	G03 X14.940722 Y-0.830804 Z-0.400000 I2.936064 J14.932565;Tiempo estimado: 1.624 segundos	1.624	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.12 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=525.410mA, IH=10.037mA, IX=720.985mA, IY=1042.295mA, IZ=68.667mA
16	G03 X17.025041 Y0.194371 Z-0.400000 I0.911438 J15.962765;Tiempo estimado: 1.672 segundos	1.672	A0=1, TH=21.12 °C, TX=25.06 °C, TY=25.87 °C, TZ=22.59	IT=525.410mA, IH=10.037mA, IX=720.985mA, IY=1042.295mA, IZ=68.667mA

Fuente: Elaboración propia.

La figura (ver Figura 23) , corresponde a la parte final (footer) de esa misma página web, donde se indica el tiempo total transcurrido durante la ejecución del proceso, así como un mensaje de estado que confirma si la operación del mecanizado se completó de forma exitosa. Esta sección es clave para el control y verificación del desempeño del sistema.

Figura 23. Final de la página del proceso de impresión.

165	G02 X28.538684 Y19.448054 Z-1.530000 I-8.592012 J-11.302689 Tiempo estimado: 0.751 segundos	0.751	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.31 °C, Tz=22.87	IT=0.009mA, IH=36.251mA, IX=91.565mA, IY=651.394mA, IZ=78.888mA
166	G02 X28.122909 Y9.420934 Z-1.530000 I-13.068381 J-4.455457 Tiempo estimado: 0.023 segundos	0.023	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.31 °C, Tz=22.87	IT=22.513mA, IH=43.378mA, IX=1001.435mA, IY=1059.419mA, IZ=71.310mA
167	G02 X21.227895 Y2.159681 Z-1.530000 I-13.113271 J5.547622 Tiempo estimado: 0.011 segundos	0.011	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.31 °C, Tz=22.94	IT=591.519mA, IH=54.538mA, IX=719.288mA, IY=1037.068mA, IZ=70.640mA
168	G02 X18.751730 Y1.217879 Z-1.530000 I-6.545119 J13.482240 Tiempo estimado: 2.119 segundos	2.119	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.37 °C, Tz=22.87	IT=520.753mA, IH=59.496mA, IX=712.515mA, IY=1046.201mA, IZ=73.527mA
169	G02 X16.490889 Y0.797800 Z-1.530000 I-3.399110 J11.739468 Tiempo estimado: 1.910 segundos	1.91	Ad=1, Th=26.87 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.37 °C, Tz=22.94	IT=26.638mA, IH=41.266mA, IX=534.452mA, IY=1051.803mA, IZ=71.151mA
170	G02 X14.974339 Y0.729571 Z-1.530000 I-1.816498 J23.032118 Tiempo estimado: 1.143 segundos	1.143	Ad=1, Th=26.87 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.37 °C, Tz=22.94	IT=26.638mA, IH=41.266mA, IX=534.452mA, IY=1051.803mA, IZ=71.151mA
171	G02 X13.997282 Y0.757149 Z-1.530000 I-0.182970 J10.639368 Tiempo estimado: 0.782 segundos	0.782	Ad=1, Th=26.87 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.37 °C, Tz=22.94	IT=44.864mA, IH=41.848mA, IX=703.795mA, IY=1383.583mA, IZ=872.815mA
172	G02 X8.235052 Y3.747083 Z-1.530000 I1.049637 J14.294102 Tiempo estimado: 0.054 segundos	0.054	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.37 °C, Tz=22.94	IT=44.864mA, IH=41.848mA, IX=703.795mA, IY=1383.583mA, IZ=872.815mA
173	G02 X1.471633 Y10.521242 Z-1.530000 I8.735085 J11.207370 Tiempo estimado: 0.626 segundos	0.626	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=25.94 °C, Ty=27.37 °C, Tz=22.94	IT=504.217mA, IH=53.796mA, IX=743.350mA, IY=1024.441mA, IZ=73.157mA
174	G02 X2.288197 Y21.418864 Z-1.530000 I12.691439 J4.486806 Tiempo estimado: 0.736 segundos	0.736	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.44 °C, Tz=22.94	IT=496.335mA, IH=54.113mA, IX=729.911mA, IY=1057.619mA, IZ=72.208mA
175	G02 X10.545153 Y26.514774 Z-1.530000 I12.691439 J4.486806 Tiempo estimado: 0.714 segundos	0.714	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.59 °C, Tz=22.94	IT=512.778mA, IH=53.794mA, IX=723.887mA, IY=1044.726mA, IZ=72.208mA
176	G02 X13.406876 Y29.139875 Z-1.530000 I4.477822 J-13.636486 Tiempo estimado: 2.343 segundos	2.343	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.58 °C, Tz=23.00	IT=527.524mA, IH=31.755mA, IX=743.586mA, IY=1056.877mA, IZ=71.415mA
177	G02 X16.168914 Y29.181588 Z-1.530000 I1.592381 J-14.052290 Tiempo estimado: 2.208 segundos	2.208	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.58 °C, Tz=22.94	IT=28.907mA, IH=33.389mA, IX=542.633mA, IY=998.863mA, IZ=71.415mA
178	G01 X16.168914 Y29.181588 Z-1.530000 F400.0 Tiempo estimado: 0.100 segundos	0.1	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.58 °C, Tz=23.00	IT=28.907mA, IH=33.389mA, IX=542.633mA, IY=998.863mA, IZ=71.415mA
179	G00 Z5.800000 Tiempo estimado: 5.224 segundos	5.224	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.58 °C, Tz=23.00	IT=28.907mA, IH=33.389mA, IX=542.633mA, IY=998.863mA, IZ=71.415mA
180	M5 Tiempo estimado: 0.100 segundos	0.1	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.58 °C, Tz=23.00	IT=0.009mA, IH=37.997mA, IX=93.269mA, IY=634.549mA, IZ=25.671mA
181	G00 X8.8009 Y0.0090 Tiempo estimado: 26.688 segundos	26.688	Ad=1, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.62 °C, Tz=23.00	IT=0.009mA, IH=37.997mA, IX=93.269mA, IY=634.549mA, IZ=25.671mA
182	M2 Tiempo estimado: 0.100 segundos	0.1	Ad=0, Th=26.94 °C, Tx=26.06 °C, Ty=27.62 °C, Tz=23.00	IT=885.686mA, IH=382.450mA, IX=732.788mA, IY=1063.916mA, IZ=76.656mA

Proceso finalizado

Fuente: Elaboración propia.

18.7 Capturas de Pantalla de la Interfaz

La interfaz permite acceder de forma inmediata a las páginas generadas durante el proceso de mecanizado, en las cuales se presentan:

- Listados y tablas con los datos obtenidos de los sensores.
- Gráficas interactivas que muestran la evolución de la temperatura y la corriente.

A continuación, se muestra una captura de pantalla de una sección de la plataforma web, en la figura (ver Figura 24), se visualiza un listado de enlaces. Cada enlace dirige a una página específica asociada a un archivo G-code enviado a la máquina para corte o fresado de una pieza, en la cual pueden consultarse las gráficas y tablas generadas al final del proceso. Estos registros quedan almacenados en el servidor, conformando un historial de trabajo para su análisis posterior.

Figura 24. Interfaz de enlaces para el acceso a las estadísticas.



Fuente: Elaboración propia.

18.8 Muestras de Mecanizado para la Obtención de Datos

Para la generación de los registros y gráficos, se realizaron pruebas de mecanizado utilizando tres tipos diferentes de piezas, que representan distintos niveles de complejidad operativa:

- Círculo (Bajo Nivel): Prueba de operación simple y básica.

- Engrane (Medio Nivel): Prueba de operación de complejidad intermedia, donde se evalúa la precisión en operaciones con mayor exigencia.
- Silueta de Caballo (Alto Nivel): Prueba de operación compleja que requiere mayor control y precisión.

Los datos obtenidos durante el mecanizado de estas piezas se utilizaron para generar las tablas de registro y las gráficas interactivas, proporcionando una visión integral del rendimiento del sistema en función de la complejidad de la operación.

A continuación, se presenta una captura de pantalla de la página de resultados,(ver Figura 24) , en la que se observan gráficas de corriente y temperatura correspondientes a cada uno de los motores durante el proceso de mecanizado.

Estas gráficas son generadas automáticamente gracias al uso de Pyplot, una biblioteca de visualización de datos de Python. Pyplot toma como entrada los datos almacenados en archivos CSV generados durante el mecanizado, que contienen los valores capturados por los sensores, las instrucciones de G-code enviadas y ejecutadas por la máquina, el tiempo de ejecución de cada línea de código, así como el tiempo total del proceso de mecanizado para cada pieza. Esto permite un análisis detallado y estructurado del comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de exigencia.

Figura 25. Gráficas corriente vs tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

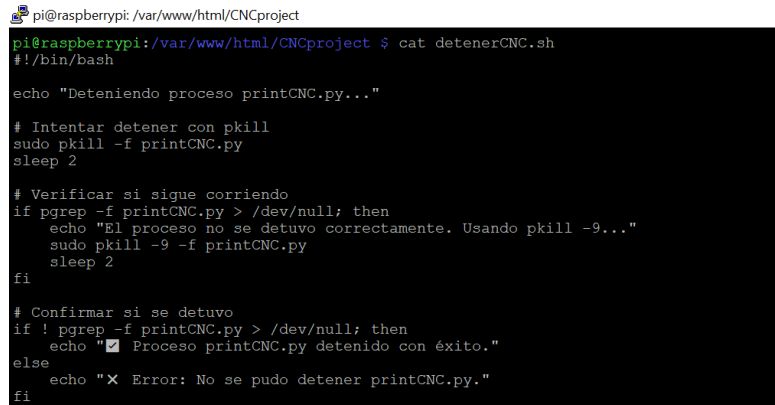
18.9 Manejo de Errores y Optimización del Sistema

Para evitar errores críticos y mejorar la estabilidad del sistema, se implementaron las siguientes estrategias:

- Uso de *flush* en la salida estándar de printCNC.py para evitar *gateway timeout* en el servidor Apache2.
- Creación de un script en Bash para finalizar de manera segura el proceso de impresión en caso de fallos, asegurando que el proceso no quede colgado. El script realiza lo siguiente:
 - Intenta detener el proceso printCNC.py utilizando *kill*.
 - Verifica la terminación del proceso y, si es necesario, utiliza *kill -9* para forzar la detención.

A continuación, se muestra una captura de pantalla del script `detenerCNC.sh` (ver Figura 26), el cual implementa esta lógica. En él se puede observar cómo se intenta finalizar el proceso de forma controlada y, en caso de no lograrlo, se procede a una detención forzada. Finalmente, el script verifica si el proceso fue efectivamente terminado e informa al usuario sobre el resultado.

Figura 26. Ejecución del script "detenarCNC.sh"



```
pi@raspberrypi: /var/www/html/CNCproject
pi@raspberrypi:/var/www/html/CNCproject $ cat detenerCNC.sh
#!/bin/bash

echo "Deteniendo proceso printCNC.py..."

# Intentar detener con pkill
sudo pkill -f printCNC.py
sleep 2

# Verificar si sigue corriendo
if pgrep -f printCNC.py > /dev/null; then
    echo "El proceso no se detuvo correctamente. Usando pkill -9..."
    sudo pkill -9 -f printCNC.py
    sleep 2
fi

# Confirmar si se detuvo
if ! pgrep -f printCNC.py > /dev/null; then
    echo "☑ Proceso printCNC.py detenido con éxito."
else
    echo "✗ Error: No se pudo detener printCNC.py."
fi
```

Fuente: Elaboración propia.

- Implementación de mecanismos de detección y recuperación automática ante errores en la comunicación serial.
- Criterios de Aceptación

El sistema se considerará tolerante a fallos si cumple con los siguientes criterios:

- Capacidad de detección y notificación de fallos en menos de 500 ms.
- Continuidad operativa con una degradación mínima del rendimiento.
- Recuperación total del sistema tras un fallo en un tiempo inferior a 10 segundos.
- Cumplimiento de normativas de seguridad industrial.

18.10 Resultados y Conclusiones

Los resultados obtenidos incluyen la correcta integración de sensores con la interfaz de control y la generación de registros y gráficas para análisis. Se evidenciaron mejoras en el flujo de ejecución del CNC, reduciendo tiempos de espera. Sin embargo, la implementación completa del sistema tolerante a fallos no fue posible dentro del tiempo disponible. Se estableció una base sólida para futuras mejoras, incluyendo:

- Definición de umbrales de corriente y temperatura para la detección de fallos.
- Mejora en la precisión de sensores y equipos de medición.

Recomendaciones para completar el sistema tolerante a fallos, se recomienda:

- Finalizar la integración sensores de vibración.
- Implementar redundancia en la captura de datos.

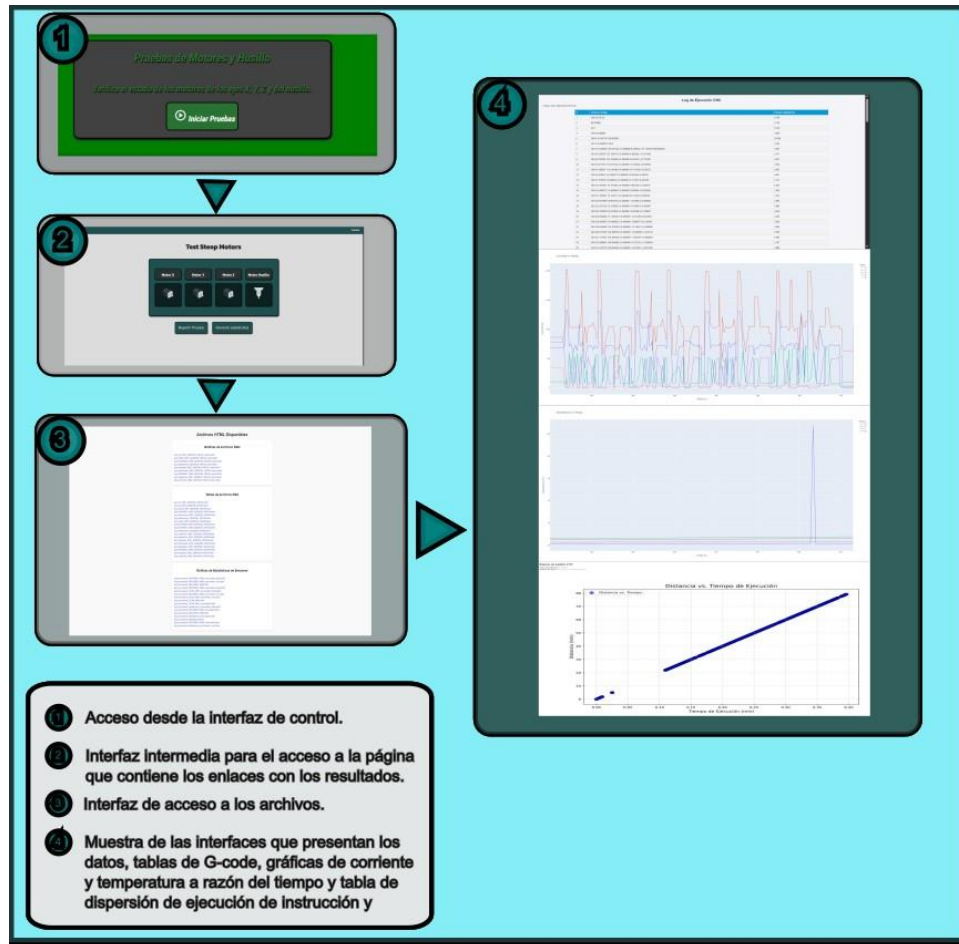
- Mejorar la precisión de sensores en la capa física.
- Integrar la automatización de respuestas ante fallos detectados.
- Optimizar el almacenamiento y análisis de datos mediante bases de datos estructuradas.
- Implementación de IA.

La figura (ver Figura 27) , muestra el flujo de navegación desde la interfaz principal de control hasta la visualización de los resultados generados durante el proceso de mecanizado. Se observa:

1. El punto de acceso inicial desde la interfaz de control para iniciar las pruebas.
2. Una interfaz intermedia que permite seleccionar el tipo de prueba o componente a evaluar.
3. Una página con los enlaces generados automáticamente que permiten acceder a los resultados almacenados.
4. Una vista detallada de la página destino, donde se presentan las tablas con los datos extraídos desde los sensores, gráficas de corriente y temperatura generadas con *pyplot*, además de análisis visuales del tiempo de ejecución de instrucciones G-code y su dispersión.

Este flujo facilita el acceso ordenado y estructurado a la información recopilada, permitiendo al operador evaluar el desempeño del sistema una vez finalizado el proceso, gracias al almacenamiento histórico de los datos en el servidor.

Figura 27. Flujo de navegación.



Fuente: Elaboración propia.

18.11 Conclusiones parciales.

El sistema de telegestión y monitorización desarrollado demostró ser eficaz en la optimización de los procesos de mecanizado de piezas CNC, mejorando la eficiencia operativa mediante la gestión remota y la visualización en tiempo real. La optimización del G-code permitió una ejecución precisa de las instrucciones, garantizando acabados de calidad y reduciendo errores, mientras que la monitorización constante del proceso contribuyó a detectar fallos y mejorar la fiabilidad de las operaciones.

Aunque la implementación del sistema tolerante a fallos no se completó por completo, las pruebas realizadas indicaron que el sistema tiene la capacidad de detectar fallos y mantener la operatividad de la máquina, sentando una base sólida para futuras mejoras. El sistema también mostró flexibilidad al permitir la personalización de parámetros de mecanizado, lo

que posibilita su adaptación a diferentes tipos de producción, lo que mejora el control y la respuesta ante errores.

Para el futuro, se recomienda seguir desarrollando el sistema tolerante a fallos, incorporar más sensores y mecanismos de recuperación automática, y optimizar el análisis de datos mediante bases de datos estructuradas. Estas mejoras, junto con la integración de alertas automáticas, potenciarán aún más la eficiencia y resiliencia del sistema, alineándolo con las exigencias de la Industria 4.0 y contribuyendo al avance de la manufactura digital en emprendimientos basados en maquinaria CNC.

19 Conclusiones.

La presente tesis ha demostrado la viabilidad técnica, funcional y económica del desarrollo de una plataforma de telegestión y monitorización para máquinas CNC, orientada a cubrir las necesidades de pequeñas y medianas empresas, especialmente en contextos industriales emergentes como el colombiano. A través del análisis de tecnologías actuales, el diseño modular del sistema y su posterior implementación, se comprobó que es posible construir una solución robusta, eficiente y asequible, enmarcada en los principios de la Industria 4.0.

El sistema propuesto, estructurado en núcleos funcionales (Ingeniería, Comunicación e Integración), fue desarrollado utilizando componentes de bajo costo y tecnologías ampliamente disponibles, sin necesidad de recurrir a equipos propietarios o de alto valor comercial. Esto representa una ventaja estratégica para pequeños emprendimientos, que tradicionalmente han estado excluidos del acceso a soluciones avanzadas de automatización, posicionando esta plataforma como una herramienta democratizadora del control digital y la supervisión remota en procesos de mecanizado.

Durante el desarrollo, se integraron sensores clave (temperatura, vibración, posición, cámaras, etc.), protocolos industriales estándar (HTTP, RTSP), y dispositivos embebidos como Raspberry Pi, para construir un sistema modular capaz de ejecutar instrucciones G-code, visualizar el proceso en tiempo real y gestionar órdenes de trabajo a distancia. Se incorporaron mecanismos de trazabilidad, notificación de errores y monitoreo visual continuo, validando su funcionalidad en condiciones reales mediante la fabricación de piezas de madera con tolerancias industriales aceptables (promedio de error: 0.041 mm).

Uno de los aportes más destacados es la capacidad del sistema para optimizar el uso del tiempo del operario, al automatizar procesos preestablecidos y permitir la gestión remota. Gracias a esta funcionalidad, el operador puede desempeñar otras tareas mientras el sistema le alerta automáticamente al finalizar la fabricación de una pieza, eliminando la necesidad de supervisión constante. Esto no solo mejora la eficiencia general, sino que también reduce la exposición a ambientes potencialmente nocivos, caracterizados por la presencia de gases, partículas o materiales con compuestos químicos.

Adicionalmente, gracias a la integración efectiva de los distintos subsistemas, la plataforma es capaz de generar históricos y estadísticas operativas. Esta capacidad analítica permite estudiar el comportamiento de las variables del proceso a lo largo del tiempo, identificar tendencias, detectar cuellos de botella y contribuir a la mejora continua de los procesos de mecanizado. En consecuencia, se facilita el aumento de la calidad de las piezas fabricadas y se agiliza la producción de forma sostenible y medible.

Aunque la implementación completa del sistema tolerante a fallos quedó como una línea futura de trabajo, se logró establecer una base funcional con mecanismos de detección de errores, registro de fallos y alertas automáticas, sentando las bases para una operación más segura y resiliente. Además, la estructura del sistema admite futuras ampliaciones, como la

integración de inteligencia artificial, mantenimiento predictivo o visualización avanzada mediante análisis de datos.

En conclusión, esta tesis aporta una solución tecnológica integral, de bajo costo, escalable y orientada a la transformación digital de talleres CNC. No solo optimiza procesos de mecanizado, sino que también promueve el acceso equitativo a tecnologías industriales avanzadas, fortalece la autonomía tecnológica nacional y habilita un camino hacia desarrollos más potentes y sofisticados en el ámbito de la automatización y la manufactura digital.

20 Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis, se identifican varias líneas de trabajo que pueden ser abordadas en futuras investigaciones o implementaciones:

- **Desarrollo completo de la tolerancia a fallos:** Si bien se sentaron las bases para la detección de errores y emisión de alertas, es necesario implementar mecanismos avanzados de recuperación automática, redundancia en la adquisición de datos y protocolos de reintento inteligente. Esto permitirá una operación aún más confiable y continua en entornos productivos reales.
- **Integración de inteligencia artificial y machine learning:** La inclusión de modelos predictivos podría facilitar el análisis automático de patrones de falla, optimización del código G y mantenimiento predictivo basado en el historial operativo. Esto elevaría el sistema a un nivel superior de autonomía y eficiencia.
- **Expansión del sistema a múltiples máquinas CNC:** Escalar la plataforma para controlar y monitorear múltiples dispositivos de forma simultánea, incorporando gestión centralizada de órdenes de trabajo, planificación de recursos y balanceo de carga operativa.
- **Implementación de una base de datos robusta:** Migrar a una arquitectura de datos más estructurada y escalable (por ejemplo, PostgreSQL o InfluxDB) para mejorar la gestión de históricos, consultas de rendimiento y generación de reportes analíticos en tiempo real.
- **Desarrollo de dashboards industriales avanzados:** Crear interfaces gráficas más sofisticadas, con visualización dinámica de variables críticas, alertas configurables, estadísticas operativas y control total desde una única interfaz web centralizada.
- **Adaptación a otros entornos de fabricación:** Extender la plataforma a otros tipos de máquinas herramienta (por ejemplo, torno CNC, impresoras 3D industriales, láser) y materiales distintos a la madera, validando la versatilidad del sistema en diversos contextos productivos.
- **Incorporación de estándares de ciberseguridad industrial:** Implementar mecanismos de autenticación fuerte, cifrado de datos y auditoría de accesos para garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información del sistema, especialmente en entornos conectados a internet.

- **Aplicación de realidad aumentada o asistencia remota:** Explorar el uso de tecnologías emergentes como RA para asistir visualmente al operario en la supervisión de piezas o mantenimiento guiado, permitiendo un soporte técnico más eficiente.
- **Certificación técnica y validación normativa:** Realizar ensayos y evaluaciones de conformidad con estándares industriales o de manufactura digital que permitan una eventual homologación del sistema para su uso comercial o académico.

21 Referencias

- Bekryl Market Analysts. (2022). *IoT enabled CNC systems market size – Analysis and forecast*. <https://bekryl.com/industry-trends/iot-enabled-cnc-systems-market-size-analysis>.
- Aguilar, L. J. (2019). *Industrias 4.0*. Alfaomega.
- Amazon Web Services. (2022). *IoT AWS*. <https://aws.amazon.com/es/iot/?nc=sn&loc=0>.
- Bahga, A., & Madiseti, V. (2014). *Internet of Things: A hands-on approach*. Universities Press.
- Beijining Jingdiao Group Co., L. (2023). *Research & development - CNC system*. <https://us.jingdiao.com/about-us/research-development/cnc-system>.
- D.Patel, C.Maiti, & S.Muthuswamy. (2023). Real-Time Performance Monitoring of a CNC Milling Machine using ROS 2 and AWS IoT Towards Industry 4.0. *IEEE EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Thecnologies.*, (págs. 776–781). doi:10.1109/EUROCON56442.2023.10199020.
- DMG MORI. (2023). *DMG MORI - CNC machine tools and automation*. <https://en.dmgmori.com/>.
- Fernández Macías, E., Hurley, J., Peruffo, E., Storrie, D., Poel, M., & Packalén, E. (2018). Future of manufacturing: Game changing technologies – Exploring the impact on production processes and work. Eurofound. <https://www.eurofound.europa.eu/publications/report/2018/future-of-manufacturing-game-changing-technologies>.
- Haas Automation, Inc. (2023). *Lista de precios de productos*. <https://www.haascnc.com/es/shop/category/pricelist.html>.
- Hood-Daniel, P., & James Floyd Kelly. (octubre de 2022). *Build your own CNC machine*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2490-7>.
- IMARC, Group. (2025). *Computer numerical control (CNC) market report by machine type and end use industry*. <https://www.imarcgroup.com/computer-numerical-control-market>.
- International Society of Automation (ISA). (2022). *ISA-95 and IIoT: Power is nothing without control*. <https://blog.isa.org/isa-95-and-iiot-power-is-nothing-without-control>.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech – National Academy of Science and Engineering. <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>.
- LinuxCNC. (2023). *G-code overview*. <https://www.linuxcnc.org/docs/html/gcode.html>.
- López López, Á. A., & Parra Santos, P. R. (2016). López López, Á. A., & Parra Santos, P. R. (2016). Diseño de una fresadora router CNC [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/35427>.
- Machado, F. X. B. G. (2022). *Improvement of a CNC Automation Approach in AFM*. Obtenido de Improvement of a CNC automation approach in AFM. [Master's thesis, Universidade de Coimbra]. Estudo Geral. <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/96834>.
- Mazak Corporation. (2023). *Mazak USA – CNC machine tools and manufacturing solutions*. <https://www.mazakusa.com/>.
- McEwen, A., & Cassimally, H. (2014). *Designing the Internet of Things*. Wiley.

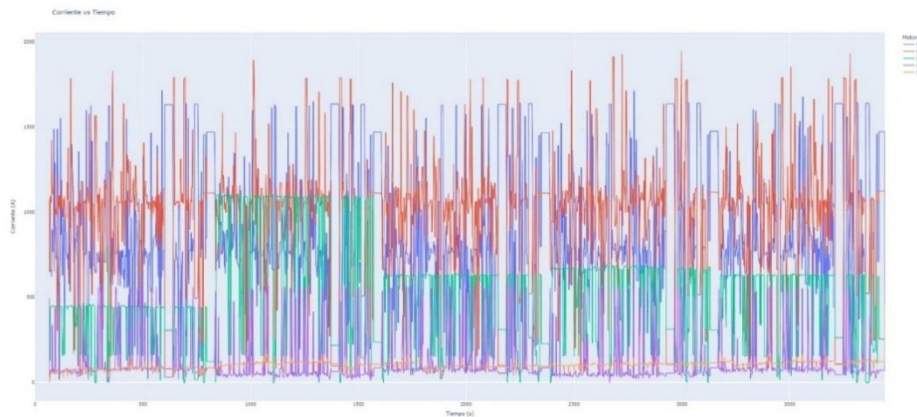
- Microsoft. (2024). *¿Qué es la autenticación en dos pasos (2FA)?* <https://www.microsoft.com/es-mx/security/business/security-101/what-is-two-factor-authentication-2fa>.
- Mishra, R., Kumar, R., Choudhary, S., & Singh, S. (2021). *Design and development of CNC plotter machine*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1969(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012049>.
- Ortiz, L. F., Fernández, J. D., Cadavíd, S., & Gallego, C. J. (2019). *Computación en la nube: Estudio de herramientas orientadas a la industria 4.0*. *Episteme. Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales y Humanas*, 6(13), 96–109. <https://doi.org/10.21501/21454086.2560>.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. The Boston Consulting Group. https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries. Obtenido de The Boston Consulting Group.
- Siddhartha, B., Chavan, A. P., HD, G. K., & Su, K. N. (2021). IoT enabled real-time availability and condition monitoring of CNC machines. In *2021 International Conference on Internet of Things and Intelligent Systems (IoTaIS)* (pp. 78–84). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IoTaIS50849.2021.9359698>.
- Souza, A. F., Martins, J., Maiochi, H., Juliani, A. D., & Jaskowiak, P. A. (2020). Development of a mobile application for monitoring and controlling CNC machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 2187–2196. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05931-y>.
- Taridala, S., Yudono, A., Ramli, M. I., & Akil, A. (2017). Expert system development for urban fire hazard assessment: Study case: Kendari City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 79, 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/79/1/012035>.
- Terry, D. (2016). Toward a new approach to IoT fault tolerance. *Computer*, 49(8), 80–83. <https://doi.org/10.1109/MC.2016.238>.
- WHEELEN, T., & HUNGER, J. (2006). *Administración estratégica y política de negocios (11.ª ed.)*. Prentice Hall.
- Wu, H., Guo, R., Fernando, Y., & Hu, Y. (2021). FERNANDO: A software transient fault tolerance approach for embedded systems based on redundant multi-threading. *IEEE Access*, 9, 67150–67166. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077190>.

22 Anexos: Fragmentos de Código y Ejemplos de Datos

22.1 Fragmento de printCNC.py:

- Gestión de hilos para la lectura de datos de sensores y envío del código G al CNC.
- Registro de datos en archivos CSV y generación de una salida HTML con las instrucciones y datos de sensores ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- Procesamiento de archivos CSV para extraer y limpiar datos mediante expresiones regulares.
- Generación de gráficas interactivas para visualizar la evolución de temperatura y corriente (ver Figura 28).

Figura 28. Gráficas interactivas.



Fuente: Elaboración propia.

22.2 Script en Bash para manejo de errores:

Terminación segura del proceso printCNC.py utilizando pkill y pkill -9, como se ve en la figura, (ver Figura 29).

Figura 29. DetenerCNC.sh.

```
pi@raspberrypi: /var/www/html/CNCproject
pi@raspberrypi:/var/www/html/CNCproject $ bash detenerCNC.sh
Deteniendo proceso printCNC.py...
[✓] Proceso printCNC.py detenido con éxito.
pi@raspberrypi:/var/www/html/CNCproject $
```

Fuente: Elaboración propia.

22.3 Ejemplo de CSV Generado:

A continuación, se muestra un ejemplo de un archivo CSV obtenido durante el mecanizado de una pieza (ver Figura 30).

Figura 30. Archivo CSV.

```
pi@raspberrypi: /var/www/html/CNCproject/estadisticasSensores
cat log_processed_REDONDO_0005_procesado.csv
Tiempo,TH,TX,TY,TZ,IT,IX,IY,IZ,IH
0.1,25.19,26.06,22.56,863.458,683.885,785.201,105.969,340.078
0.1,21.06,25.19,26.0,22.56,863.458,683.885,785.201,105.969,340.078
0.1,21.06,25.19,26.0,22.56,863.458,683.885,785.201,105.969,340.078
4.0,21.06,25.19,26.0,22.56,863.458,683.885,785.201,105.969,340.078
26.508,21.06,25.19,26.0,22.56,863.458,683.885,785.201,105.969,340.078
4.32,21.06,25.06,25.87,22.5,509.498,732.738,1048.534,72.526,14.897
3.097,21.06,25.06,25.87,22.5,10.935,1325.259,2018.628,136.787,0.0
3.157,21.12,25.06,25.87,22.5,19.023,1330.117,2018.208,52.622,0.0
4.437,21.06,25.06,25.87,22.5,19.445,708.546,1057.647,600.963,0.0
4.364,21.12,25.06,25.87,22.5,518.643,755.447,1039.81,69.46,0.0
5.007,21.12,25.06,25.87,22.5,17.161,595.896,1020.831,592.404,0.0
4.941,21.12,25.06,25.87,22.5,528.526,728.936,1043.928,69.888,10.092
5.127,21.12,25.06,25.87,22.5,13.578,631.246,1026.161,593.676,0.0
5.03,21.12,25.12,25.87,22.5,0.0,1104.151,1048.637,71.361,0.0
1.624,21.12,25.12,25.87,22.5,525.41,720.965,1042.295,68.667,10.037
1.672,21.12,25.06,25.87,22.5,525.41,720.965,1042.295,68.667,10.037
2.664,21.12,25.06,25.87,22.5,248.262,742.979,1654.948,590.296,14.639
2.665,21.19,25.06,25.87,22.5,0.0,795.411,603.191,524.201,0.0
4.436,21.12,25.06,25.87,22.5,12.582,323.511,1056.88,75.165,0.0
4.364,21.12,25.12,25.94,22.5,0.0,631.425,761.767,301.744,0.0
3.05,21.19,25.06,26.0,22.56,529.636,723.129,1035.529,70.839,0.0
3.05,21.19,25.12,26.0,22.56,446.559,720.699,1062.218,69.145,14.219
5.055,21.12,25.12,26.06,22.56,350.867,715.101,1047.208,69.565,13.467
5.065,21.12,25.06,26.06,22.62,0.0,658.891,1110.761,396.689,0.0
3.187,21.12,25.06,26.06,22.62,529.154,727.62,1034.793,71.625,16.43
3.098,21.12,25.06,26.06,22.62,0.0,687.787,976.105,566.053,0.0
0.1,21.12,25.12,26.12,22.69,0.0,680.441,855.608,559.134,0.0
4.32,21.12,25.12,26.12,22.69,0.0,680.441,855.608,559.134,0.0
0.1,21.12,25.06,26.12,22.69,0.0,1310.468,2014.718,64.481,10.621
1.733,21.12,25.06,26.12,22.69,0.0,1313.0,2012.342,13.086,14.363
4.32,21.12,25.12,26.19,22.69,0.0,1313.0,2012.342,13.086,14.363
6.405,21.12,25.12,26.19,22.75,0.0,97.584,570.482,148.149,22.614
6.751,21.12,25.12,26.19,22.75,0.0,733.432,825.232,527.442,0.0
8.023,21.06,25.12,26.25,22.69,526.623,722.866,1056.506,68.511,10.506
8.011,21.12,25.12,26.31,22.75,522.349,713.993,1040.023,70.993,14.79
2.119,21.06,25.19,26.37,22.75,535.395,709.19,1052.492,74.742,10.404
1.91,21.06,25.19,26.37,22.75,0.0,700.789,925.519,556.281,0.0
1.143,21.06,25.19,26.37,22.75,0.0,700.789,925.519,556.281,0.0
0.782,21.06,25.12,26.37,22.81,267.016,667.433,166.394,553.064,23.665
6.654,21.06,25.12,26.37,22.81,267.016,667.433,166.394,553.064,23.665
6.626,21.06,25.19,26.44,22.81,385.538,744.253,1025.546,69.62,18.967
8.736,21.06,25.19,26.44,22.81,18.495,535.555,1051.126,71.627,0.0
```

Fuente: Elaboración propia.